

Camila Scheller

**USO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO
TERMO-ENERGÉTICA DE UMA CASA EFICIENTE NA FRANÇA**

Florianópolis

2018



Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico
Engenharia Civil

Camila Scheller

**USO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO TERMO-
ENERGÉTICA DE UMA CASA EFICIENTE NA FRANÇA**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Roberto Lamberts, PhD.

Coorientadora: Eng. Civil. Ana Paula Melo, Dra.

FLORIANÓPOLIS

2018

Ficha de identificação da obra

Scheller, Camila

Uso da simulação computacional para avaliação termo energética de uma casa eficiente na França / Camila Scheller ; orientador, Roberto Lamberts, coorientadora, Ana Paula Melo, 2018.

77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Eficiência energética em edificações. 3. Simulação Computacional. 4. EnergyPlus. I. Lamberts, Roberto. II. Melo, Ana Paula. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Camila Scheller

**USO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO TERMO-
ENERGÉTICA DE UMA CASA EFICIENTE NA FRANÇA**

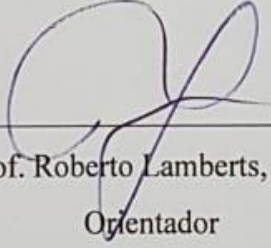
Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em engenharia civil” e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação.

Florianópolis, 28 de junho de 2018.

Banca Examinadora:

Prof. Luciana Rohde, Dra.

Coordenadora do Curso



Prof. Roberto Lamberts, PhD.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Ana Paula Melo, Dr.^a

Coorientadora

Prof. Ricardo Rüther, PhD.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Deivis Luis Marinoski, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha família, aos meus amigos e a todos que sempre estiveram comigo e me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu pai, Artur Scheller, que está cuidando de mim lá do céu e está nas minhas lembranças todos os dias e em meu coração.

Agradeço a minha família, meus padrinhos, aqueles que escolheram ser meus pais Edson e Marlene, meus irmãos Alan Felipe, Beatriz e Rodrigo, por todo o apoio e amor, sem vocês nada disso seria possível.

À Universidade Federal de Santa Catarina pelo ensino gratuito e de qualidade e seu corpo docente pelos ensinamentos proporcionados ao longo da graduação.

Ao professor Roberto Lamberts, por todo o conhecimento que me proporcionou durante a graduação e pela orientação neste trabalho. A minha coorientadora Ana Paula Melo, pela paciência, dedicação e por me auxiliar durante toda a graduação e acreditar em mim sempre.

A todos os meus colegas de laboratório, em especial Leticia Gabriela Eli e Mateus Bavaresco, pelo suporte e animação no trabalho.

Aos meus amigos Ana Paula, Vinicius, Maria, Luiza e Tiago, por estarem comigo desde os primeiros anos de graduação me acompanhando e em especial ao meu amigo Paulo por sempre me apoiar e ser esse colega de apartamento tão divertido. Aos amigos que a UFSC e o intercâmbio me deram, em especial Paola e Nadia.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que de alguma forma me apoiaram e me auxiliaram não só neste trabalho, mas em toda a minha graduação.

Todas as conquistas começam com o simples ato de acreditar que elas são possíveis.
(Autor desconhecido)

RESUMO

Este trabalho utiliza a simulação computacional para analisar o desempenho de uma edificação residencial localizada na França e, com base nos resultados, foram propostas medidas de eficiência energética para a redução da carga térmica de aquecimento anual e dos graus-hora de sobreaquecimento da edificação. As estratégias consistem na alteração da transmitância térmica, capacidade térmica e absorptância da parede externa da edificação e cobertura da sala, adição de sombreamento nas aberturas e de uma estratégia de ventilação. Os resultados foram analisados através da carga térmica de aquecimento e dos graus-hora acima de 26°C durante o ano inteiro. As temperaturas foram analisadas na sala e um dormitório, ambientes de permanência prolongada. Considerando-se os resultados obtidos através das simulações no programa EnergyPlus, observou-se que a adição de venezianas e o aumento da capacidade térmica das paredes externas da edificação e da cobertura da sala apresentaram resultados favoráveis em relação aos valores de graus-hora de sobreaquecimento e de carga térmica de aquecimento. A ventilação natural foi a estratégia que apresentou maior impacto no período de calor, reduzindo significativamente a quantidade de graus-hora acima de 26°C nos dois ambientes. A partir dos resultados das simulações paramétricas, vinte combinações de estratégias foram simuladas e pode-se observar que oito delas melhoraram a eficiência termo-energética do edifício durante o ano inteiro, sendo que quatro delas foram avaliadas como as melhores combinações, eliminando grande parte dos graus-hora de sobreaquecimento e reduzindo a carga térmica de aquecimento da edificação. As quatro combinações têm como base a adição de ventilação natural, venezianas e o aumento da capacidade térmica da parede e cobertura da sala. Em uma delas ainda se reduziu o valor da absorptância solar da cobertura de 0,8 para 0,5, outra altera esse mesmo parâmetro para um valor de 0,3, outra alterou o valor da absorptância da parede de 0,5 para 0,8 e a outra combinou apenas as estratégias que foram utilizadas como base. A combinação que apresentou o melhor desempenho e melhorou a eficiência da edificação durante o ano inteiro foi a combinação que aliou o aumento da capacidade térmica da parede externa da edificação e da cobertura da sala, o aumento da absorptância da parede, a adição de uma veneziana de tábuas horizontais inclinadas e a adição de ventilação natural. A combinação dessas estratégias reduziu em 99,9% os graus-hora de sobreaquecimento na sala e em 99,82% no dormitório e ainda reduziu em 8,7% a carga térmica de aquecimento em relação ao caso base da edificação.

Palavras-chave: Eficiência Energética em Edificações. Simulação Computacional. EnergyPlus.

ABSTRACT

This research uses the EnergyPlus program simulations to analyze the performance of a single-family house in France and, based on the results, some energy efficiency strategies were proposed to reduce the annual heating thermal load and the building overheating degree-hours. The strategies are based on changing the U-factor, thermal capacity and absorptance of the building exterior wall of the building and living room roof, the application of shading to the windows and a natural ventilation system. The results were analyzed by the thermal load of heating and the degrees-hour above 26°C during the whole year. The analyzed areas were the room and a bedroom, environments of prolonged stay. The temperatures will be analyzed in the living room and bedroom. Adding venetians and the increase of the thermal capacity of the external walls and the leaving room's roof were good strategies for reducing the amount of overheating degree-hours and the heating thermal load for the house. The natural ventilation was the strategy that performed the biggest impact during the overheating time, decreasing the amount of degree-hour over 26°C in both rooms. After analyzing all the parametric simulations results, twenty strategic combinations were simulated and it was possible to affirm eight of those improved the building's thermo-energy efficiency during all the year, four of them were tagged as the best ones, reducing most of the overheating degrees-hour and the heating thermal load of the house. Those four combinations are based on adding natural ventilation system, venetian and the increase of the thermal capacity of the external wall and roof. In one of those, the roof's thermal absorptance value where reduced from 0.8 to 0.5, in the other reduces to 0.3 this same parameter, the third increased the wall's thermal absorptance value from 0.5 to 0.8 and the last one made no changes on the thermal absorptance value. The combination chose as the best one is that whose performed the best performance and improved the efficiency of the building during the whole year. The chosen was the one that united the increase in the thermal capacity of the building external wall and living room roof, the increase of the wall thermal absorptance, the use of wood venetians and the use of natural ventilation system. Combining those factors, impacted on reducing by 99.9% the leaving room overheating degrees-hours and by 99.82% at the bedroom, else by 8.7% the heating thermal load in comparing with the initial case.

Keywords: Energy Efficiency in Building. Computer Simulation. EnergyPlus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo Final Total (TFC) mundial por fonte de energia de 1971 a 2015 (Mtep).....	18
Figura 2 - Consumo Final Total (TFC) 2015 por setor.	19
Figura 3 – Consumo (%) de eletricidade mundial por setor de 1973 e 2015	19
Figura 4 – Evolução das exigências regulamentares de consumo energético para novas edificações: redução impulsionada pela Lei <i>Grenelle</i>	22
Figura 5 – Evolução do número de residência climatizadas e da taxa de crescimento de equipamentos de climatização instalados (com bomba de calor ciclo reverso) na França metropolitana.	24
Figura 6 – Edificação estudada.	31
Figura 7 – Edificação modelada no SketchUp.	32
Figura 8 - Planta baixa pavimento superior.....	32
Figura 9 – Planta baixa pavimento subterrâneo	32
Figura 10 - Veneziana de tábuas verticais.....	38
Figura 11 - Veneziana de tábuas horizontais inclinadas	38
Figura 12 – Carga térmica anual de aquecimento – CASO BASE	42
Figura 13 - Temperaturas no verão - Caso base.....	43
Figura 14 - Temperaturas na semana mais quente do verão - Caso base.....	43
Figura 15 – Graus-hora – Caso base	44
Figura 16 – Resultados alternativas de parede	45
Figura 17 – Resultados alternativas de cobertura.....	46
Figura 18 – Resultados alternativas de absorção solar.....	48
Figura 19 – Resultados alternativas de venezianas	48
Figura 20 – Resultados ventilação natural	49
Figura 21 – Resultados Caso Base e Caso base 1	53
Figura 22 – Resultados combinações 2, 3, 4 e 5	54
Figura 23 - Resultados combinações 6, 7 e 8.....	56
Figura 24 - Resultados combinações 9, 10 e 11	57
Figura 25 - Resultados Combinações 12, 13 e 14	58
Figura 26 - Resultados combinações 15, 16 e 17	59
Figura 27 - Resultados combinações 18, 19 e 20	60
Figura 28 - Resultados das combinações	61

Figura 29 – Combinação com resultados favoráveis quanto à carga térmica de aquecimento.....	63
Figura 30 – Resultados das melhores combinações de estratégias	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores máximos de transmitância térmica (U) das superfícies limitados pela RT2012.	23
Tabela 2 – Zonas térmicas da edificação.....	33
Tabela 3 – Percentual de Abertura das fachadas.	33
Tabela 4 – Construção dos componentes construtivos.....	34
Tabela 5 – Características das aberturas de vidro.	35
Tabela 6 - Atividade metabólica dos ambientes de permanência prolongada	35
Tabela 7 - Zonas aquecidas.	36
Tabela 8 – Estratégias para melhoria da eficiência termo-energética	37
Tabela 9 - Características das aberturas de vidro com venezianas.....	39
Tabela 10 – Padrão de uso da veneziana.	39
Tabela 11 – Zonas térmicas ventiladas.....	39
Tabela 12 – Padrão de uso ventilação natural	40
Tabela 13 - Padrão de uso ventilação natural reduzida pelo uso de venezianas	40
Tabela 14 – Resultados das aplicações individuais das estratégias no caso base	50
Tabela 15 – Combinações das estratégias	52
Tabela 16 – Combinações 2, 3, 4 e 5.....	54
Tabela 17 - Combinações 6, 7 e 8	55
Tabela 18 - Combinações 9, 10 e 11	56
Tabela 19 - Combinações 12, 13 e 14	58
Tabela 20 - Combinações 15, 16 e 17	59
Tabela 21 - Combinações 18, 19 e 20	60
Tabela 22 – Resultados das combinações	62
Tabela 23 - Melhores combinações de estratégias	64
Tabela 24 – Melhor combinação de estratégias	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ADEME – *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie*

AQS – Água Quente Sanitária

ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*

BBC – *Bâtiments Basse Consommation*

Bbiomax – *Impact Bioclimatique Maximale*

BEPOS – *Bâtiments à Energie Positive*

BESTEST – *Building Energy Simulation Test*

CEN – *European Committee for Standardization*

Cepmax – *Consommation d'Énergie Primaire Maximale*

CEREMA – *Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement*

DOE – *Department of Energy (US)*

E+ – *EnergyPlus*

EPDB – *Energy Performance of Buildings Directive*

EU – *European Union*

IEA – *International Energy Agency*

HVAC – *Heating, Ventilation and Air Conditioning*

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

IWEC - *International Weather for Energy Calculations*

LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações

NBR – Norma Brasileira

PAF – Percentual de Abertura na Fachada

RT – *Réglementation Thermique*

RTQ-C - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas

RTQ-R - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

Ticref – *Température Intérieure Conventionnelle Maximale*

TFC – *Total Final Consumption*

TMY - *Typical Meteorological Year*

WBT - *White Box Technologies*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	18
2.1	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES.....	18
2.1.1	Regulamentação de eficiência energética na França.....	21
2.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	25
2.3	ESTRATÉGIAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	27
2.4	RESUMO DO CAPÍTULO.....	29
3	MÉTODO.....	31
3.1	EDIFICAÇÃO DE ESTUDO.....	31
3.2	ESTRATÉGIAS PARA A MELHORIA DA EFICIÊNCIA TERMO-ENERGÉTICA 37	
3.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	41
4	RESULTADOS.....	42
4.1	CASO BASE	42
4.2	ESTRATÉGIAS PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA TERMO-ENERGÉTICA	45
4.2.1	Parede externa	45
4.2.2	Cobertura	46
4.2.3	Absortância solar.....	47
4.2.4	Sombreamento	48
4.2.5	Ventilação natural	49
4.2.6	Combinações das estratégias	51
5	CONCLUSÕES	66
5.1	Limitações do trabalho	68
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	69

REFERÊNCIAS 70

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

De acordo com o Balanço Energético Mundial (IEA, 2017a), o Consumo Final Total (TFC) de energia mais do que duplicou entre 1971 e 2015, sendo que o setor que compreende as edificações representa 30% do consumo total de energia. Ou seja, o setor de edificações é responsável por um terço da demanda de energia mundial, correspondendo a 49,3% do consumo total de energia elétrica mundial.

Diante disso, a preocupação com a redução no consumo de energia vem crescendo significativamente, inclusive na área de edificações. Surgindo a necessidade de encontrar soluções para reduzir o consumo energético, começou-se a trabalhar na construção de edifícios mais eficientes, com o desenvolvimento de pesquisas e medidas abrangendo o termo eficiência energética nas edificações, buscando garantia de conforto térmico, visual e acústico ao usuário, com baixo consumo de energia.

O uso de programas computacionais vem contribuindo na busca de soluções mais eficientes, auxiliando no desenvolvimento de modelos físicos que representam o comportamento térmico e energético de edificações, permitindo a simulação de diferentes cenários, a avaliação dos impactos que determinadas medidas podem gerar e a análise das melhores alternativas de projeto de forma rápida, antes mesmo da sua implantação. Existem programas que permitem a análise de sistemas de iluminação artificial e iluminação natural, sistemas de aquecimento, resfriamento, ventilação e sistemas de condicionamento de ar, entre outros sistemas. Alguns programas mais complexos, como o EnergyPlus (DOE, 2018b) modelar e analisar todo o edifício e seus respectivos sistemas.

Em consequência da crise energética, medidas foram tomadas em alguns países através da implantação de normas e regulamentações com o objetivo de definir requisitos mínimos de desempenho térmico para as edificações. Em 1975, nos Estados Unidos, foi publicada a norma ASHRAE 90.1, que fornece os requisitos mínimos para o projeto de eficiência energética da maioria dos edifícios, seus sistemas e equipamentos; bem como critérios para determinar o cumprimento desses requisitos. Nesse período a União Europeia iniciou estudos referente ao tema, mas foi em 2002 que surgiu a Diretiva Europeia sobre o Desempenho Energético dos Edifícios (EPDB), que foi reformulada em 2010, definindo requisitos mínimos para o desempenho energético dos edifícios (EU OFFICIAL JOURNAL, 2002). Na França, o primeiro regulamento térmico surgiu em 1974, a RT1974, com objetivo de reduzir o consumo das

edificações residenciais. Em aplicação da Diretiva Europeia sobre o Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) e do Plan Bâtiment Durable, aprovado em 2009 pela Lei Grenelle, que exigiu que, a partir de 2012, todos os edifícios novos fossem de baixo consumo, a França revisou a sua regulamentação e publicou a atual RT2012 que reduziu o limite de consumo médio de energia primária para 50 kWh/m²/ano (FRANÇA, 2011). A próxima RT entra em vigor em 2020 e passará a exigir que todas as novas construções sejam edifícios de energia positiva, onde a produção de energia da edificação deve ser maior que o consumo (PLAN BATIMENT DURABLE, 2016).

As exigências do aumento do isolamento da envoltória das edificações são severas no atual RT2012, em razão da preocupação com a redução do consumo de aquecimento, que é obtida significativamente em climas com invernos longos e rigorosos e verões curtos e brandos. No entanto, o clima europeu vem passando por mudanças e eventos extremos, trazendo consequências cada vez mais preocupantes. Estudos mostram que os últimos verões europeus foram os mais quentes dos últimos dois milênios (FRANCO, 2017) e a França vem sendo um dos países mais atingidos por essas ondas de calor. Estes episódios extremos somados à envoltória das edificações europeias, que apresentam um alto nível de isolamento, geram sobreaquecimento nas edificações causando inúmeros períodos de desconforto.

Chvatal (2007) estudou, através de simulações computacionais, diversos modelos de edifícios, com diferentes espessuras de isolamento da envoltória, e distintos ganhos internos, padrões de ventilação e taxas de sombreamento e avaliou as condições nas quais o sobreaquecimento ocorre, e as suas consequências, tanto em termos do conforto dos ocupantes, quanto do aumento do consumo de energia para arrefecimento e a correspondente potencial eliminação das economias de inverno. Os resultados mostraram que, quando o isolamento da envoltória é aumentado, a fim de que se possa evitar o sobreaquecimento excessivo, no verão, é necessário controlar rigorosamente os ganhos internos e solares e garantir condições adequadas para a ventilação natural, pois este é um aspecto de grande impacto na redução do sobreaquecimento. E que, quando há condicionamento artificial de ar e os ganhos internos são muito elevados, há a tendência de eliminação total das economias energéticas devido ao aumento do consumo de arrefecimento, ou seja, uma envolvente muito isolada só faz com que haja maior consumo de energia e sobreaquecimento.

Frente a isso, este trabalho apresenta a análise da influência dos parâmetros transmitância térmica, absorvância solar de paredes e coberturas, do sombreamento e da ventilação natural na carga térmica de aquecimento e nas temperaturas internas de uma edificação situada na França. Com base nos resultados serão propostas medidas de eficiência

energética para a redução da carga térmica de aquecimento anual e dos graus-hora de sobreaquecimento da edificação.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é avaliar a carga térmica de aquecimento e as temperaturas internas de uma residência eficiente localizada na França e propor medidas para a melhoria da sua eficiência termo-energética, através da aplicação da simulação computacional.

1.2.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos destacam-se:

- Modelar a edificação residencial no programa *EnergyPlus*;
- Avaliar a carga térmica de aquecimento e as temperaturas internas da edificação;
- Propor medidas visando a melhoria da eficiência termo-energética da edificação e, com base nos resultados de graus-hora de sobreaquecimento e carga térmica de aquecimento, analisá-las para encontrar a melhor combinação de estratégias para a edificação estudada.

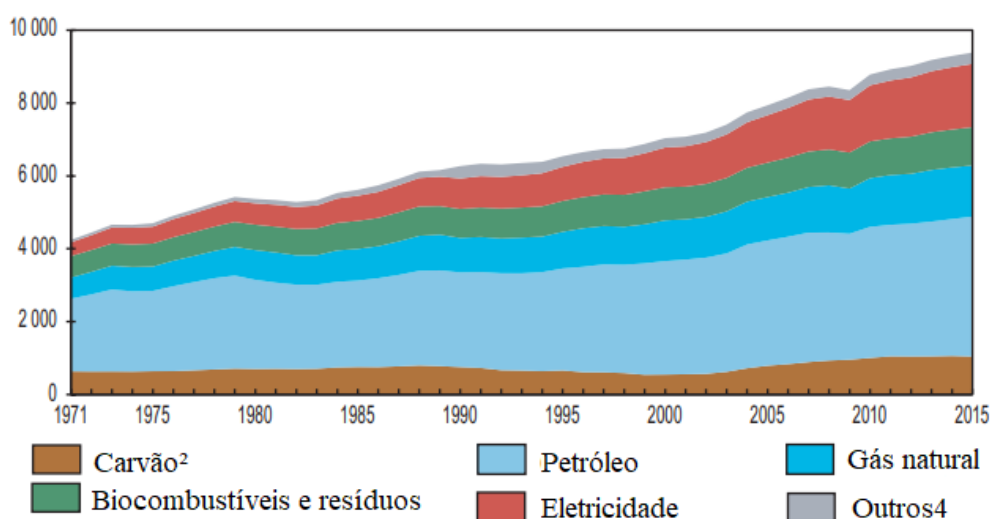
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

Nas últimas décadas a preocupação com o consumo de energia se tornou um assunto de extrema importância. Com a necessidade de se adotar estratégias para reduzir o consumo energético, vem se trabalhando na construção de edifícios mais eficientes.

Entre 1971 e 2015 o Consumo Final Total (TFC) de energia mundial mais do que duplicou, sendo que em 2015 o TFC atingiu 9384 Mtep (IEA, 2017a), como pode se observar na Figura 1.

Figura 1 – Consumo Final Total (TFC) mundial por fonte de energia de 1971 a 2015 (Mtep).

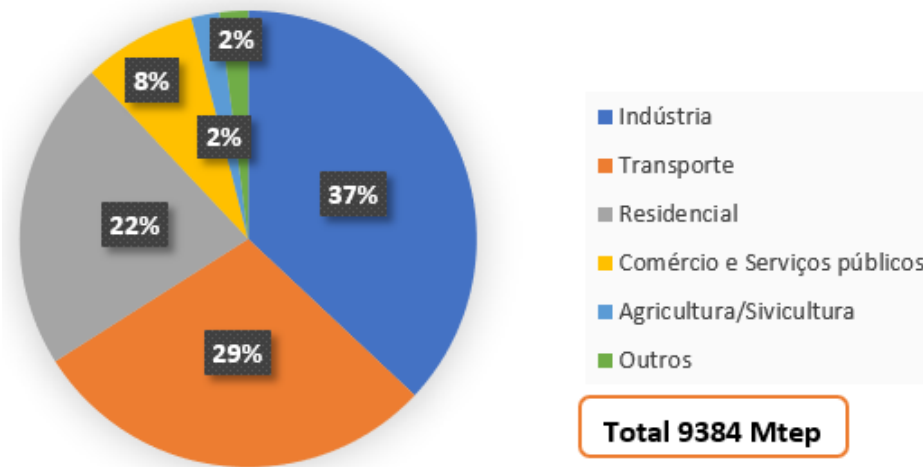


1. Inclui aviação internacional e bunkers marinhos internacionais.
2. Nestes gráficos, a turfa e o xisto betuminoso são agregados ao carvão.
3. Dados para biocombustíveis e consumo final de resíduos foram estimados para vários países.
4. Inclui energia solar térmica e geotérmica

Fonte: Adaptado de International Energy Agency, 2017b.

Em 2015, o setor da indústria era responsável pela maior parcela do consumo de energia mundial, com 37% do total, em seguida, com 29% do consumo total, está o setor de transportes. Os setores residencial e comercial/serviços públicos representam 22% e 8%, respectivamente, do consumo de energia total, ou seja, o setor que compreende as edificações é responsável por um terço da demanda de energia mundial (Figura 2).

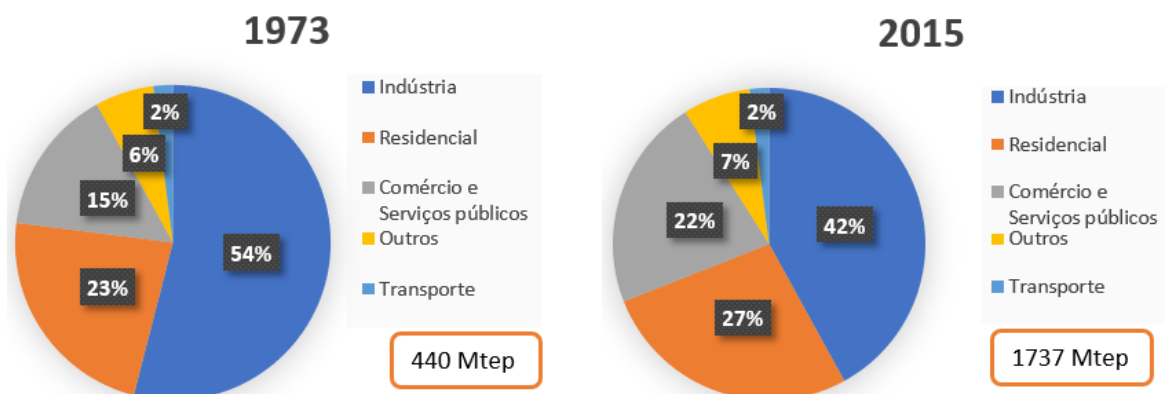
Figura 2 - Consumo Final Total (TFC) 2015 por setor.



Fonte: Adaptado de International Energy Agency, 2017a.

O setor das edificações apresenta o maior crescimento no consumo de energia elétrica e de gás natural (IEA, 2017b). De acordo com a Figura 3, o consumo mundial de eletricidade dos setores residenciais e comerciais/serviços públicos aumentou de 38,2% do total em 1973 para 49,3% em 2015.

Figura 3 – Consumo (%) de eletricidade mundial por setor de 1973 e 2015



Fonte: Adaptado de International Energy Agency, 2017c.

Diante disso, começaram a surgir pesquisas e medidas abrangendo o termo eficiência energética em edificações, condição de uma edificação possibilitar conforto térmico, visual e acústico ao usuário com baixo consumo de energia.

Vale e Vale (1975) publicam o livro “The Autonomous House”, um guia técnico para o desenvolvimento de soluções habitacionais autossuficientes em energia, ambientalmente corretas, relativamente fáceis de manter e com aparência tradicional. Eles também definem o conceito de “Edifício Verde”, referindo-se a uma estrutura e à aplicação de processos que são ambientalmente responsáveis e eficientes em recursos ao longo do ciclo de vida de um edifício: do planejamento ao projeto, construção, operação, manutenção, renovação e demolição.

Em 1975 na Alemanha, Horster e Steinmuller construíram a “Casa Experimental Phillips”, uma casa experimental super isolada, equipada com aquecedores no piso, ventilação controlada, tecnologia solar e bomba de calor (HOLLADAY, 2010).

Em alguns países, a partir da crise energética de 1970, começaram a surgir normas e regulamentações com o objetivo de definir requisitos mínimos de desempenho térmico e energético para as edificações.

Em 1975, nos Estados Unidos, foi publicada pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) a versão original da norma ASHRAE 90.1, que em 2016 teve a sua décima edição publicada (ASHRAE, 2016). A norma fornece os requisitos mínimos para o projeto de eficiência energética da maioria dos edifícios, com exceção de edifícios residenciais baixos; seus sistemas e equipamentos; bem como critérios para determinar o cumprimento desses requisitos.

No Brasil, em 2001, quando o país passou por uma crise de abastecimento de eletricidade, foi dado início às primeiras ações de eficiência energética e apoio às energias renováveis. Foi quando a Lei nº 10.295, mais conhecida como Lei de Eficiência Energética, foi publicada, determinando a existência de níveis mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no país, bem como de edificações construídas (BRASIL, 2001). Em 2005 foi promulgada a NBR15220, que retrata diretrizes construtivas para edificações residenciais unifamiliares de interesse social por meio de recomendações de estratégias bioclimáticas para cada zona bioclimática brasileira, estabelecidas na própria norma (ABNT, 2005). Em 2008 foi lançada a NBR15575 que trata do desempenho das edificações residenciais, sendo dividida em seis partes. Em 2013, a NBR 15575 foi revisada e é obrigatória desde então (ABNT, 2013). Em 2009, o Brasil desenvolveu a etiqueta de eficiência energética brasileira, com o objetivo de incentivar as melhorias propostas pelas normas, que traz em uma escala, de A (máximo) até E (mínimo) ao o nível de eficiência energética das edificações no Brasil. As diretrizes para a emissão da etiqueta são apresentadas no Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de

Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C) e no RTQ-R, destinado às edificações residenciais (BRASIL, 2010; BRASIL, 2012).

Na Europa, com a criação do Protocolo de Quioto em 1997, que teve como objetivo fazer com que os países membros assumissem o compromisso de reduzir a emissão de gases de dióxido de carbono na atmosfera, obrigando-os a definirem ações, como medidas de incentivo de uso racional de energia; surgiu em 2002 a Diretiva Europeia sobre o Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD), com o objetivo de melhorar o desempenho energético dos edifícios, definindo requisitos mínimos (EU OFFICIAL JOURNAL, 2002). Os países membros deveriam pôr em vigor às exigências em seus regulamentos até 04 de janeiro de 2006, quando diversas normas europeias foram publicadas para a implementação da Diretiva (CEN STANDARDS, 2004). Em 2010, uma reformulação da EPBD foi publicada, exigindo que até 2020, todos os edifícios novos sejam edifícios de energia zero (EU OFFICIAL JOURNAL, 2010).

2.1.1 Regulamentação de eficiência energética na França

Na França, foi adotado em 1974 o primeiro regulamento térmico, a RT 1974 (*Réglementation Thermique*), com objetivo de reduzir o consumo das edificações residenciais. A RT 1974 é aplicada apenas em novos edifícios residenciais e visa reduzir em 25% o consumo de energia dos edifícios, impondo uma camada fina de isolamento e a instalação de uma regulação automática dos sistemas de aquecimento (ERT, 2012). Com a segunda crise do petróleo, em 1979, a RT 1979 foi publicada com o objetivo de reduzir em 20% o consumo de energia dos edifícios residenciais, em relação a RT 1974, tornando obrigatória a aplicação do alto isolamento padrão aplicado voluntariamente desde 1980 (COLLET, 2011). Posteriormente, em 1988, adotou-se a RT 1988, que se aplicava também a edifícios não residenciais. Esta RT inclui requisitos mínimos de desempenho para o envelope e os sistemas em vigor (ERT, 2012).

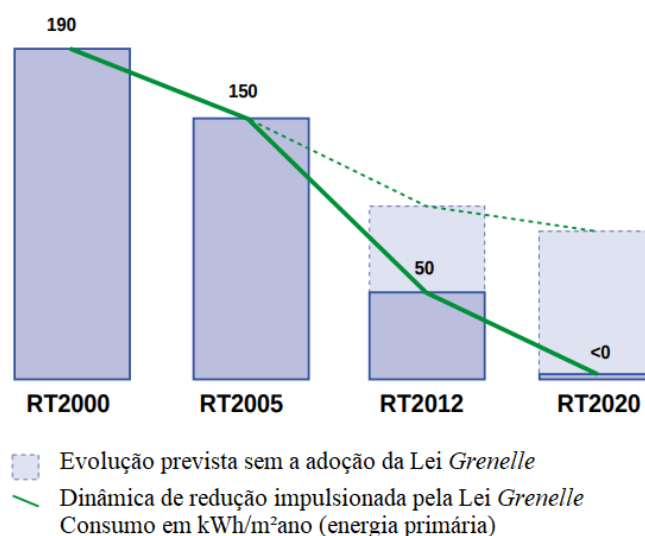
Com a publicação da Diretiva Europeia sobre o Desempenho Energético dos Edifícios, a RT foi reformulada, surgindo a RT2000, que estabelece condições a serem respeitadas: limite de consumo para aquecimento/arrefecimento e água quente sanitária (AQS); valores de desempenho mínimos para uma série de componentes (isolamento, ventilação, sistema de aquecimento, ar condicionado, iluminação); e conforto no verão, onde a temperatura interior convencional obtido no verão deve ser inferior à temperatura de referência. A RT2000 visa reduzir o consumo de energia de residências em 20% em comparação com a RT1988 e uma redução de 40% no consumo de energia de edifícios comerciais. Em relação ao conforto no verão em edifícios não climatizados, foram estabelecidas temperaturas máximas a serem

respeitadas, baseadas principalmente na possibilidade de abrir as janelas, inércia térmica e proteção solar. Em seguida, foi publicada a RT2005, que visa uma redução adicional de 15% no consumo de energia de novos edifícios. Este regulamento se aplica também à edifícios existentes que passam por reformas ou extensões (COLLET, 2011).

Após 2010, a regulamentação foi revisada em aplicação da Diretiva Europeia de Desempenho Energético de Edifícios (EPDB) de 2010 e do *Plan Bâtiment Durable*, aprovado em 2009 pela Lei *Grenelle*, que exigiu que, a partir de 2012, todos os edifícios novos fossem de baixo consumo (PLAN BATIMENT DURABLE, 2016). A RT2012 se aplica a todos os projetos de construção e impõe uma redução significativa do consumo médio de energia primária, passando a ter o valor máximo de 50 kWh/m²/ano para fins de aquecimento, água quente sanitária, ventilação, climatização e iluminação (FRANÇA, 2010). Na antiga RT, a RT2005, esse valor variava entre os 80 e os 250 kWh/m²/ano (FRANÇA, 2006). O atual regulamento tem três requisitos de desempenho variando de acordo com a posição geográfica e a utilização do edifício: a limitação do consumo de energia, a necessidade bioclimática e uma temperatura de referência interna para garantir o conforto do verão (FRANÇA, 2011).

Em 2020 a próxima RT entra em vigor e passará a exigir mais do que a EPDB de 2010 (Figura 4): todas as novas construções deverão ser edifícios de energia positiva, ou seja, de que a produção de energia da edificação seja maior que o consumo (PLAN BATIMENT DURABLE, 2016).

Figura 4 – Evolução das exigências regulamentares de consumo energético para novas edificações: redução impulsionada pela Lei *Grenelle*.



Fonte: Adaptado de Regulamentação Térmica, 2011.

Em consequência da aplicação desses regulamentos, a exigência do aumento do isolamento da envoltória das edificações está cada vez mais severa. Na RT2012, as exigências

do nível de isolamento da envoltória aumentaram aproximadamente em 40% com relação à RT2005. A Tabela 1 apresenta os valores máximos de transmitância térmica (U) das superfícies (FRANÇA, 2011).

Tabela 1 – Valores máximos de transmitância térmica (U) das superfícies limitados pela RT2012.

Superfície	Transmitância térmica máxima [W/m ² K]
Piso inferior	0,25
Paredes exteriores	0,25
Telhado	0,125

Fonte: FRANÇA, 2011

A justificativa para esse tipo de medida é a redução do consumo energético, que como visto, vem sendo cada vez mais exigida. Segundo Maldonado (2005), os países com climas mais frios preocuparam-se principalmente com a redução do consumo de aquecimento, através de isolamento eficiente e envoltórias de baixo vazamento, juntamente com a promoção de ganhos solares através de áreas envidraçadas relativamente grandes. Em climas com invernos longos e rigorosos e verões curtos e brandos, níveis altos de isolamento podem reduzir o consumo energético significativamente. No entanto, as vantagens passam a não ser tão óbvias no verão, que não recebeu medidas com a mesma quantidade de atenção que as medidas de conservação de energia para o inverno nas regulamentações europeias.

Porém, o clima europeu vem passando por mudanças e eventos extremos, trazendo consequências cada vez mais preocupantes. De acordo com especialistas, as ondas de calor que começaram em 2003, com episódios de extremo calor, serão cada vez mais frequentes, longas e fora dos períodos tradicionais de altas temperaturas (FRANCO, 2017).

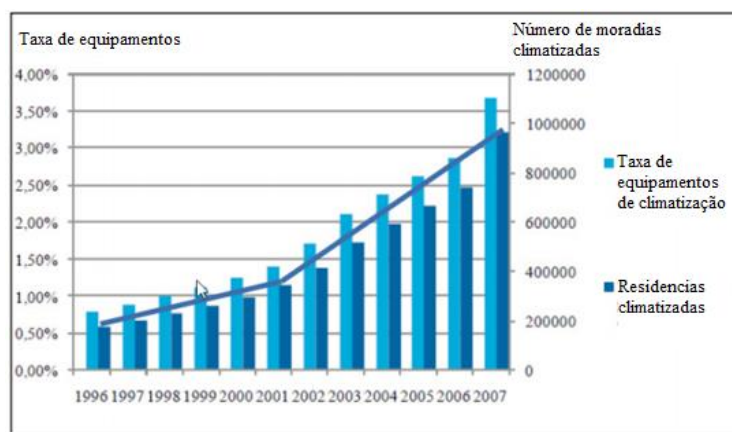
A França vem sendo um dos países mais atingidos. Estimando-se que aproximadamente 15.000 pessoas, a maioria idosos, morreram por causa do calor, segundo Bhattacharya (2003). No último verão, o país enfrentou períodos com ondas de calor raras para as épocas do ano em que aconteceram, com temperaturas ultrapassando os 35°C em boa parte do país.

Estes episódios extremos somados à envoltória das edificações europeias, que apresentam um alto nível de isolamento e a falha de não evitar ganhos solares e controlar os ganhos internos resulta na dificuldade de dissipar os ganhos de calor para o exterior, gerando sobreaquecimento nas edificações causando inúmeros períodos de desconforto.

Assim, como na maioria da Europa, não é comum que as edificações francesas possuam sistemas de resfriamento, principalmente nas residências. Porém, com as medidas adotadas para reduzir o consumo no inverno, sem medidas adequadas para os períodos de calor, os usuários podem sentir a necessidade de instalar sistemas de resfriamento mecânicos, contribuindo no aumento do consumo energético. Em edificações onde esses sistemas já são utilizados, em certos casos pode ocorrer um aumento das necessidades de energia de arrefecimento (CHVATAL; MALDONADO; CORVACHO, 2005). E consequentemente, a economia de energia anual alcançada pode ser nula.

De acordo com dados de 2016 da CEREMA, (*Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement*) a utilização de sistemas de arrefecimento vem crescendo cada vez mais. No setor residencial, a taxa de equipamentos é mais baixa em comparação com o setor comercial, mas o condicionamento de ar está constantemente aumentando após a onda de calor de 2003, onde em um período de apenas 4 anos, a taxa de crescimento de equipamentos instalados praticamente dobrou, como visto na Figura 5 (CEREMA, 2016). Espera-se que essas tendências continuem nos próximos anos e possam ser aceleradas pelos efeitos da mudança climática. De acordo com uma previsão do cenário energético e climático para 2035-2050 da ADEME (*Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie*), apesar de uma melhoria significativa na eficiência energética de equipamentos e edifícios até 2050, o consumo está aumentando, quase metade de todas as novas e antigas habitações estarão equipadas, em comparação com 4,5% em 2010 (ADEME, 2017).

Figura 5 – Evolução do número de residência climatizadas e da taxa de crescimento de equipamentos de climatização instalados (com bomba de calor ciclo reverso) na França metropolitana.



Fonte: Adaptado de CEREMA, 2016.

A circunstância exige soluções paliativas, que aliviem as consequências causadas. O encarregado de estudos sobre o clima do Instituto de Planejamento e Urbanismo da Ile-de-France, Erwan Cordeau (2017, *apud* FRANCO, 2017) afirma que as cidades estão sendo obrigadas a criar estratégias e planos para o clima e a energia como preparação para os efeitos das mudanças climáticas, e que é necessário o uso de algumas medidas para solucionar o problema das edificações, como a utilização de cores claras com baixa absorvância solar, do sombreamento e ventilação.

2.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Segundo Mendes et al. (2005), avaliar o desempenho térmico de uma edificação envolve grande quantidade de variáveis interdependentes e conceitos multidisciplinares. Assim, o uso do computador foi muito importante para o desenvolvimento de modelos físicos que representam o comportamento térmico e energético de edificações, permitindo a simulação de diferentes cenários e a análise das melhores alternativas de projeto de forma mais rápida. Frente a isso, pode se observar a importância da simulação computacional, que permite avaliar os impactos que determinadas medidas podem gerar em uma edificação antes mesmo da sua implantação, na fase de projeto de uma nova edificação ou de retrofits.

Os programas de simulação computacional de edificações surgiram na década de 70, com o objetivo de testar alternativas para as edificações com menor impacto energético. Os primeiros softwares foram desenvolvidos nos Estados Unidos e Europa, entre eles o NBSLD, DOE-2, BLAST, RADIANCE e ESP-r. Mais tarde, programas mais complexos foram desenvolvidos, entre eles o EnergyPlus.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) lista diversos programas de simulação no *Building Energy Software Tools Directory* (DOE, 2018a). Entre eles se encontram o RADIANCE, que analisa sistemas de iluminação artificial e iluminação natural; o HVACSIM+, que modela e analisa sistemas de condicionamento de ar; e o EnergyPlus que é um programa mais complexo, permitindo modelar e analisar todo o edifício e seus sistemas.

O programa EnergyPlus (DOE, 2018b), desenvolvido a partir dos programas BLAST e DOE-2, é um programa de simulação termo-energética de edificações elaborado com o apoio do Departamento de Energia dos Estados Unidos. O software permite modelar geometria, componentes construtivos, padrões de uso, sistemas de iluminação, ventilação, aquecimento e condicionamento de ar, e realizar a análise térmica e energética da edificação e de seus sistemas. Este programa é validado pela ASHRAE Standard 140-2014 (ASHRAE, 2017), desenvolvida

a partir do método BESTEST (Building Energy Simulation Test), criado pela IEA (International Energy Agency) (JUDKOFF; NEYMARK, 1995). A cada nova versão do programa EnergyPlus é realizada uma nova validação pela ASHRAE Standard 140 para identificar as possíveis diferenças entre as versões em estimar a demanda e pico do sistema de condicionamento de ar para aquecimento e resfriamento.

Porém, esses softwares ainda são pouco utilizados como ferramenta de trabalho, pois mesmo com a facilidade na obtenção de resultados, uma simulação ainda exige conhecimento multidisciplinar dos usuários devido à complexidade dos fenômenos envolvendo o comportamento térmico de edifícios, que implica em uma grande quantidade de dados de entrada nas simulações (WESTPHAL; LAMBERTS, 2005). Além disso, o aprendizado e domínio das ferramentas é lento devido à complexidade dos programas.

Zhu (2013) comparou as capacidades de modelagem de carga térmica e os resultados de simulação de três programas de simulação computacional: EnergyPlus, DeST e DOE-2.1E. Os casos de teste, baseados nos testes da ASHRAE Standard 140, foram projetados para isolar e avaliar os principais fatores de influência responsáveis pelas discrepâncias nos resultados entre o EnergyPlus e o DeST. Se concluiu que há pouca diferença entre os resultados do EnergyPlus e do DeST, apesar de haver muitas discrepâncias entre os algoritmos de balanço de calor. O DOE-2.1E pode produzir grandes erros para os casos em que as zonas adjacentes têm condições muito diferentes ou se uma zona é condicionada em tempo parcial, enquanto as zonas adjacentes não são condicionadas. Isto deveu-se à falta de uma rotina de equilíbrio térmico zonal rigorosa no DOE-2.1E, e ao manuseio em estado estacionário do fluxo de calor através de paredes e divisórias interiores.

Melo (2005) utilizou a simulação computacional para desenvolver um estudo de melhoria na eficiência energética de um hotel na cidade de Florianópolis. Com o modelo calibrado sobre o edifício real, identificou-se que os principais usos finais de energia elétrica são: o sistema de iluminação com 35% de participação no consumo anual do prédio, a caldeira elétrica com 25%, o sistema de condicionamento de ar 24% e os demais equipamentos 16% de participação. Algumas alternativas de *retrofit* foram propostas, quais sejam: alteração no sistema de iluminação dos quartos de hóspedes, alteração no sistema de condicionamento de ar, aquisição de um gerador de energia elétrica e uso de coletores solares para aquecimento de água. Todas as alternativas reduziram o custo anual com energia elétrica, mas a única que se mostrou viável economicamente foi à alteração do sistema de iluminação, com um retorno do investimento inicial estimado em um ano.

2.3 ESTRATÉGIAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Para manter o conforto térmico em uma edificação, existem algumas estratégias bioclimáticas que podem ser utilizadas de acordo com o nível de desconforto existente.

Para melhorar o conforto em dias quentes, a ventilação natural e o sombreamento são exemplos de estratégias simples de ser implementadas e que se, bem utilizadas, são muito eficazes contra o calor. A ventilação garante a perda de calor de um ambiente através da renovação de ar, atua no conforto térmico do usuário, aumentando as trocas por convecção na superfície do seu corpo; e o sombreamento é uma medida que evita o aquecimento do ambiente, barrando e controlando a recepção da radiação solar, contrariamente à insolação (ANDRADE, 1996).

Em dias frios, componentes com baixa transmitância térmica são adequados para evitar perdas de calor do ambiente. Os isolantes térmicos são compostos por materiais de baixa condutividade e elevada resistência térmica, combinados para se atingir uma transmitância térmica global menor do sistema.

Melo (2007) fez uma análise do desempenho energético de edificações comerciais com base na influência da transmitância e da capacidade térmica das paredes externas e coberturas de edificações comerciais. A análise foi realizada através de simulação computacional, utilizando o programa EnergyPlus. Foram simulados casos com diferentes condições de carga interna, absorvância solar externa, padrão de uso, razão de área de janelas nas fachadas, entre outros parâmetros; sempre analisando a influência destes em relação ao consumo anual de energia elétrica das edificações. Foram observados três climas: Florianópolis, Curitiba e São Luís. Foram adotadas duas tipologias sendo que a tipologia 1 representa um edifício de 5 pavimentos e a tipologia 2 uma loja comercial de 1 pavimento. Para analisar os ganhos e as perdas de calor dos componentes opacos da edificação realizou-se o cálculo do balanço térmico das edificações, o qual envolve os processos de condução, convecção e radiação. O sistema de iluminação, pessoas, equipamentos, condicionamento de ar e infiltração também fazem parte do cálculo do balanço térmico. Na análise dos casos observou-se que o aumento da transmitância térmica das paredes da tipologia 1 para todos os climas analisados proporcionou uma redução do consumo anual da edificação, principalmente para os casos simulados em conjunto com alta densidade de carga interna ou alto padrão de uso e com baixa absorvância solar externa. Nos casos referentes à tipologia 2, notou-se que o aumento da transmitância térmica da cobertura representou um aumento do consumo anual da edificação para todos os casos simulados nos três climas adotados. Observa-se que os resultados encontrados para os

valores de transmitância térmica contestam os limites adotados pela ASHRAE Standard 90.1, podendo estes limites ser excedidos uma vez que para os três climas analisados a utilização de uma parede com alto valor de transmitância térmica facilita a dissipação dos ganhos internos para o ambiente externo reduzindo o consumo do sistema de condicionamento de ar.

Matos (2007) analisou o desempenho térmico do projeto de uma residência unifamiliar através de simulação computacional, definindo estratégias de acordo com as recomendações da NBR 15220 para a zona bioclimática 3. As alternativas adotadas nas simulações consistiram em alterar a área de ventilação, sombrear as janelas, variar a transmitância térmica de paredes e cobertura, verificar a influência da orientação no desempenho térmico das residências e variar a absorptância de paredes e cobertura. Além disso, foram definidas diferentes estratégias de ventilação. Considerando-se os resultados obtidos através das simulações, pode-se dizer que a área de abertura de 15% com relação à área de piso visando à ventilação natural foi a mais adequada para esse tipo de residência. A estratégia de sombreamento das janelas durante o verão foi uma alternativa eficaz para a redução das temperaturas internas durante esse período. A área mínima de abertura requerida para a ventilação natural no código de obras de Florianópolis (8% da área de piso) resultou no pior desempenho mesmo sombreada. A limitação do atraso térmico estabelecido pela NBR 15220 não se justifica, na medida em que todas as paredes com transmitância dentro dos limites da norma apresentaram quantidades de graus-hora semelhantes. As paredes muito leves apresentaram desempenho inferior ao das paredes simuladas com capacidade térmica e transmitância limitada pela norma. A parede de concreto com 5 cm de espessura, configurou a pior hipótese de vedação para a residência. A NBR 15220 limita, através do Fator de Calor Solar (FCS), o valor da absorptância das paredes do caso base em 36% e essa limitação é benéfica para o desempenho térmico da residência. Por outro lado, o limite de FCS estabelecido pela norma para coberturas, não limitou a absorptância das coberturas simuladas, com exceção da cobertura de telha de fibrocimento. Porém, observou-se que as coberturas escuras possuem desempenho muito inferior às coberturas claras. A limitação da absorptância constitui-se numa importante estratégia para a diminuição da quantidade de graus-hora para a residência. Quando as janelas da residência estavam fechadas, a quantidade de trocas de ar de maior ocorrência durante o ano foi a de uma vez o volume do ambiente. E quando as janelas estavam abertas, na maioria das vezes em que houve a ventilação, esses valores foram de até 20 ou 30 trocas de ar por hora.

Sorgato (2009) investigou a influência das áreas de superfície expostas ao exterior e do tamanho dos ambientes no desempenho térmico das edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente, em quatro diferentes tipologias residenciais, através de simulação

computacional, utilizando o programa EnergyPlus. Foram simulados casos com diferentes propriedades térmicas da envoltória (paredes e coberturas), variando as transmitâncias e absorptâncias dos componentes construtivos. A combinação da transmitância e da absorptância da cobertura apresentou grandes influências nos graus-hora de resfriamento para os quatro modelos. Porém, os graus-hora de aquecimento não apresentaram correlações com os componentes da envoltória. Observou-se que o aumento do tamanho do ambiente resultou em uma quantidade maior de graus-hora de aquecimento. Através das análises do balanço térmico, identificou-se que a ocupação predomina nos ganhos internos de calor dos ambientes, sendo mais significativa nos modelos com ambientes menores e menos relevante nos modelos com ambientes maiores. A cobertura foi um dos principais componentes construtivos nos ganhos e perdas de calor. Nos ambientes menores as paredes demonstraram maior influência que nos ambientes maiores. Através da ventilação, ocorreram as maiores perdas de calor em todos os modelos, e, geralmente, em todas as estações, com exceção do inverno.

Em seu estudo, Eli (2017) avaliou como medidas de eficiência energética podem influenciar na demanda de energia para resfriamento de uma edificação multifamiliar de baixa renda. A edificação residencial utilizada foi definida com base no programa do governo federal brasileiro “Minha Casa Minha Vida”. O trabalho explora diferentes medidas de eficiência energética, como diferentes paredes e coberturas; absorptância solar da envoltória da edificação; sombreamento e aumento do fator de abertura. As análises foram executadas usando os dados climáticos de São Paulo e Salvador. Os resultados de carga térmica anual para resfriamento obtidos por cada medida de eficiência energética foram comparados. A análise consistiu na avaliação dos resultados obtidos para cada medida de eficiência energética adotando o metamodelo presente no Regulamento Brasileiro para Etiquetagem de Eficiência Energética de Edificações Residenciais. Após isto, a análise de retorno financeiro foi aplicada para cada medida de eficiência energética adotada. Os resultados obtidos para o clima da cidade de São Paulo indicaram que a combinação de medidas mais eficiente foram o uso de isolante térmico nas paredes e cobertura, baixa transmitância térmica e sombreamento. Para o clima de Salvador foram obtidos os mesmos resultados, com exceção do uso de isolamento térmico nas paredes.

2.4 RESUMO DO CAPÍTULO

A revisão bibliográfica deste trabalho procurou apresentar informações referentes ao surgimento de medidas de eficiência energética em edificações, como a aplicação de normas e regulamentações que definem requisitos mínimos de desempenho térmico e energético para as

edificações. Foi realizada uma breve revisão sobre a regulamentação de eficiência energética na França, sua alta exigência no nível de isolamento da envoltória devido à preocupação com a redução do consumo de aquecimento e as consequências das medidas desses regulamentos e das ondas de calor nas edificações nos períodos de calor. Também se apresentou a importância do uso da simulação computacional nos estudos de eficiência energética em edificações e para encerrar o capítulo, foram apresentados alguns trabalhos que analisaram estratégias para melhoria da eficiência termo-energética das edificações.

3 MÉTODO

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho foi dividida em duas etapas: a descrição da edificação modelada e a definição das alternativas de estratégias para a melhoria da eficiência energética da edificação base.

Na descrição da modelagem da edificação base foram apresentados os parâmetros de entrada utilizados na simulação computacional e que foram inseridos no programa EnergyPlus, versão 8.7. São eles: geometria, componentes construtivos, ganhos internos e padrões de uso, e o sistema de aquecimento utilizado.

As estratégias consideradas são descritas na segunda etapa. Serão aplicadas 15 alternativas que serão analisadas com base nos resultados da carga térmica e das temperaturas internas da edificação.

3.1 EDIFICAÇÃO DE ESTUDO

A edificação estudada neste trabalho é uma residência unifamiliar, localizada na cidade francesa de St. Martin d'Uriage.

A edificação é composta por um pavimento com 2 dormitórios, sala, cozinha, escritório, 2 lavabos, sala de banho, closet, adega, escada e circulação, com dimensões de 16,9 m x 9,9 m x 2,7 m; e um pavimento subterrâneo com garagem e depósito, com dimensões de 16,9 m x 9,9 m x 2,4 m. A residência é representada na Figura 6.

Figura 6 – Edificação estudada.



A geometria da edificação foi modelada no programa SketchUp (Figura 7). As zonas, superfícies e sombreamentos foram modelados com o apoio do software Euclid, que permite a importação das informações da geometria para o software EnergyPlus, onde as superfícies

foram vinculadas com base na edificação real. Na Figura 7 pode ser visualizado o croqui perspectivo e na Figura 8 e Figura 9, as plantas baixas do modelo.

Figura 7 – Edificação modelada no SketchUp.

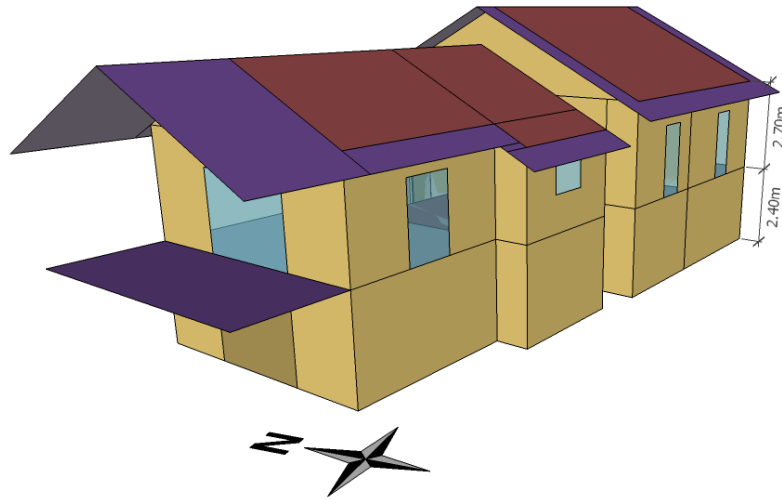


Figura 8 - Planta baixa pavimento superior

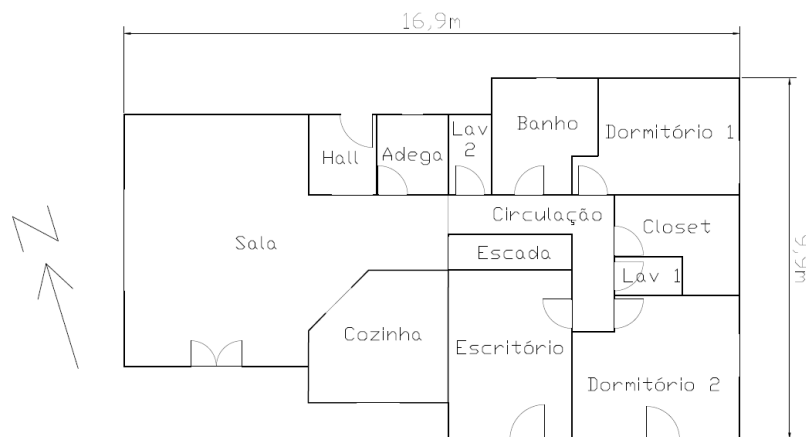
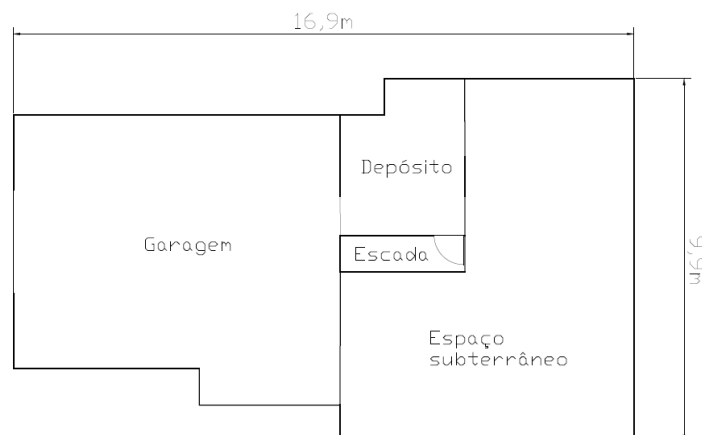


Figura 9 – Planta baixa pavimento subterrâneo



A edificação foi modelada com dezoito zonas térmicas, sendo quatorze para os ambientes, duas para a cobertura e uma para o espaço subterrâneo vazio entre o solo e o pavimento superior da edificação (Tabela 2).

Tabela 2 – Zonas térmicas da edificação.

Zonas térmicas	
Zona	Área (m²)
Dormitório 1	13,22
Dormitório 2	16,96
Sala	44,22
Cozinha	12,57
Escritório	15,76
Lavabo 1	2,00
Lavabo 2	2,65
Closet	7,51
Banho	8,58
Adega	4,31
Escada	3,37
Hall	4,15
Circulação	7,97
Garagem	65,21
Depósito	13,34
Espaço subterrâneo	61,30
Telhado 1	79,20
Telhado 2	26,43

A edificação apresenta as maiores fachadas voltadas para Nordeste-Sudoeste. O percentual de abertura na fachada (PAF ou WWR) de cada de cada fachada pode ser observado através da Tabela 3.

Tabela 3 – Percentual de Abertura das fachadas.

Áreas das aberturas			
Orientação em relação ao norte (°)	Orientação	Área das aberturas (m²)	PAF (%)
17	Nordeste	1,71	4
107	Sudeste	3,00	22
197	Sudoeste	8,14	18
287	Noroeste	6,02	22

O beiral da cobertura e o piso da sacada foram modelados como componentes de sombreamento. A janela da fachada Sudoeste da sala é localizada na sacada, sendo sombreada pelo beiral da cobertura.

Os componentes construtivos da envoltória apresentam transmitância térmica muito baixas, devido ao seu alto nível de isolamento. A parede externa do pavimento superior, composta por bloco de concreto de 20 cm e 16 cm de lã de vidro, apresenta transmitância

térmica de 0,19 W/(m²K), capacidade térmica de 215 kJ/m²K e absorptância solar de 0,5, referente à cor areia. A cobertura, composta por 20 cm de concreto e 38 cm de lã de vidro, apresenta transmitância térmica de 0,09 W/(m²K), capacidade térmica de 442 kJ/m²K e absorptância solar de 0,8, referente à cor cinza. A Tabela 4 apresenta detalhadamente a construção dos componentes construtivos do modelo.

Tabela 4 – Construção dos componentes construtivos.

Componente	Composição	Transmitância térmica [W/m ² K]	Capacidade térmica [kJ/m ² K]
Piso subterrâneo	Placa de reboco (1,3 cm)	0,18	384
	Laje de concreto (20 cm)		
	Concreto pesado (5 cm)		
	Painel de poliuretano (12 cm)		
	Argamassa (4,7 cm)		
	Piso (1 cm)		
Piso intermediário*	Placa de reboco (1,3 cm)	0,18	618
	Concreto pesado (20 cm)		
	Painel de poliuretano (12 cm)		
	Argamassa (10 cm)		
	Piso (0,7 cm)		
Cobertura	Telha de cerâmica (2,2 cm)	0,09	442
	Lã de vidro (38 cm)		
	Placa de reboco (1,3 cm)		
	Concreto pesado (20 cm)		
Cobertura sala	Telha de cerâmica (2,2 cm)	0,09	18
	Lã de vidro (38 cm)		
	Placa de reboco (1,3 cm)		
Parede escada	Placa de reboco (1,3 cm)	0,22	233
	Concreto pesado (10 cm)		
	Lã de vidro (14 cm)		
	Placa de reboco (1,3 cm)		
Parede cave	Revestimento exterior (2 cm)	0,30	213
	Bloco de concreto (20 cm)		
	Lã de vidro GR32 (10 cm)		
	Placa de reboco (1,3 cm)		
Parede externa subterrâneo	Revestimento exterior (2 cm)	4,04	211
	Bloco de concreto (20 cm)		
	Placa de reboco (1,3 cm)		
Parede externa	Revestimento exterior (2 cm)	0,19	215
	Bloco de concreto (20 cm)		
	Lã de vidro (16 cm)		
	Placa de reboco (1,3 cm)		
Parede interna	Placa de reboco (1,3 cm)	3,70	186
	Bloco de concreto (20 cm)		
	Placa de reboco (1,3 cm)		

*A construção Piso intermediário também é utilizada na diferença de nível (parede em comum entre o sobressolo e o andar superior)

Para as aberturas dos ambientes foram utilizados vidro duplos com gás argônio. A Tabela 5 apresenta as características das aberturas de vidro do modelo. Algumas aberturas apresentam veneziana de madeira.

Tabela 5 – Características das aberturas de vidro.

Componente	Composição	U [W/m²K]	Fator Solar
Porta de vidro deslizante	Vidro duplo com gás argônio	1,50	0,42
Janela deslizante	Vidro duplo com gás argônio	1,40	0,50
Porta abertura francesa	Vidro duplo com gás argônio	1,40	0,51

Todos os valores e padrões de uso de ocupação, iluminação e equipamentos foram utilizados com base na Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INMETRO, 2018), sendo definidos para os ambientes de permanência prolongada: sala e dormitórios. O padrão de ocupação deste modelo representa uma família composta por quatro moradores: um casal e dois filhos, que não estão na residência no período da manhã nos dias de semana. A sala é utilizada por toda a família e os dormitórios são ocupados por duas pessoas. A ocupação dos dormitórios ocorre em 100% das horas de 22h às 08h, e a ocupação da sala ocorre em 50% das horas de 14h às 19h e em 100% das horas de 19h às 23h, para todos os dias da semana. Os valores de taxa metabólica foram considerados de acordo com a atividade realizada em cada ambiente, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Atividade metabólica dos ambientes de permanência prolongada

Zona	Atividade realizada	Calor produzido para área de pele = 1,80m² [W/pessoa]
Sala	Sentado ou assistindo TV	108
Dormitórios	Dormindo ou descansando	81

Com relação à densidade de potência de iluminação, foi considerado o valor 5W/m² nos dormitórios e na sala. O Padrão de uso de iluminação nos dormitórios ocorre em 100% das horas de 06h às 08h e de 22h às 24h, e na sala ocorre em 100% das horas de 16h às 22h, para todos os dias da semana. Foi considerada a potência de equipamentos na sala de 120W, para o período de uso das 14h às 22h, durante todo o período de simulação.

O sistema de aquecimento adotado na residência é um sistema de piso radiante hidráulico ligado a um sistema de aquecimento solar de circulação forçada.

O sistema de aquecimento solar é composto por 4 placas solares de 2,5m² cada, inclinados em 24° e integrados ao telhado da fachada sudoeste (197° em relação ao norte). A geometria das placas foi modelada no SketchUp, integradas ao telhado da residência e em seguida

o modelo foi exportado para o EnergyPlus, onde o sistema foi modelado. Também é composto por um tanque de 500 litros para a reserva da água quente e de um aquecedor de água elétrico auxiliar. O sistema de aquecimento solar foi modelado com o auxílio do exemplo do modelo do *ExampleFile* do EnergyPlus: *SolarCollectorFlatPlateWater*.

Todas as zonas do pavimento superior são aquecidas por meio de um piso radiante, onde a água quente circula sob o piso por tubos com o auxílio de uma bomba. A Tabela 7 mostra as zonas aquecidas.

Tabela 7 - Zonas aquecidas.

Composição
Dormitório 1
Dormitório 2
Lavabo 1
Lavabo 2
Closet
Escritório
Banho
Hall
Circulação
Cozinha
Adega
Sala

O padrão de uso do piso radiante é de 24 horas para o período de 30/04 a 30/09.

O piso radiante foi modelado através do objeto: *Zone HVAC: Low Temperature Radiant: Constant Flow*. O diâmetro dos tubos radiantes é 13 milímetros e a temperatura nos tubos varia entre os 25 e os 30°C, como o sistema foi modelado com um fluxo constante.

Foi utilizada a temperatura média do ar como temperatura de controle e pretende-se que no período de inverno a temperatura não baixe dos 18°C.

O modelo não apresenta sistema de resfriamento.

Para a simulação é necessário inserir os dados climáticos do local por meio de um arquivo climático. O arquivo climático da cidade de St Martin d'Uriage não se encontra disponível, então foi adotado o arquivo climático de Grenoble, cidade com clima mais próximo do local. O arquivo IWEC2 (International Weather for Energy Calculations versão 2.0), desenvolvido pela ASHRAE em conjunto com a White Box Technologies (WBT), é um arquivo TMY (Typical Meteorological Year), com período de registro de 1984 até 2008.

Para a temperatura do solo desta simulação foram utilizados os valores existentes no arquivo climático adotado, em uma modelagem simplificada, utilizando o objeto *Site:GroundTemperature:BuildingSurface*. Neste caso, a temperatura do solo não foi

considerada um parâmetro importante pois os componentes construtivos externos da edificação são bem isolados, resultando em pequenas trocas de calor entre o piso e o solo.

O terreno da edificação foi especificado como Suburbs, sendo um terreno suburbano arborizado.

3.2 ESTRATÉGIAS PARA A MELHORIA DA EFICIÊNCIA TERMO-ENERGÉTICA

Neste trabalho, foram consideradas 15 alternativas de estratégias para a melhoria da eficiência termo-energética que serão simuladas de forma paramétrica.

As alternativas adotadas consistiram em fazer as seguintes alterações:

- 1) Transmitância térmica das paredes e cobertura;
- 2) Capacidade térmica das paredes e cobertura;
- 3) Absortância solar externa da envoltória;
- 4) Sombreamento;
- 5) Ventilação.

As estratégias (E) adotadas podem ser visualizadas na Tabela 8.

Destaca-se que a alteração da transmitância das superfícies é realizada por meio da variação da espessura do isolante, os materiais construtivos são os mesmos.

Tabela 8 – Estratégias para melhoria da eficiência termo-energética

COMPONENTE	CASO BASE	ESTRATÉGIAS	
Parede externa	Bloco de concreto + isolante 16 cm $U = 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$ $CT = 215 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	E1: U1par	Isolante 12 cm $U = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$
		E2: U2par	Isolante 8 cm $U = 0,36 \text{ W/m}^2\text{K}$
		E3: U3par	Isolante 4 cm $U = 0,67 \text{ W/m}^2\text{K}$
		E4: CTpar	Parede dupla bloco de concreto + isolante 16 cm $CT = 384 \text{ kJ/m}^2\text{K}$
Cobertura	Telha cerâmica+ isolante 38 cm + concreto 20 cm $U = 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$ $CT = 442 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ Telha cerâmica+ isolante 38 cm $CT_{\text{sala}} = 18 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	E5: U1cob	Isolante 28 cm $U = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$
		E6: U2cob	Isolante 18 cm $U = 0,36 \text{ W/m}^2\text{K}$
		E7: U3cob	Isolante 8 cm $U = 0,67 \text{ W/m}^2\text{K}$
		E8: CTcob	Concreto 20 cm $CT_{\text{sala}} = 442 \text{ kJ/m}^2\text{K}$
Absortância	$\alpha_{\text{parede}} = 0,5$ $\alpha_{\text{cobertura}} = 0,8$	E9: $\alpha 1_{\text{par}}$	$\alpha_{\text{parede}} = 0,8$
		E10: $\alpha 2_{\text{par}}$	$\alpha_{\text{parede}} = 0,3$
		E11: $\alpha 1_{\text{cob}}$	$\alpha_{\text{cobertura}} = 0,5$
		E12: $\alpha 2_{\text{cob}}$	$\alpha_{\text{cobertura}} = 0,3$
Sombreamento	Sem venezianas	E13: vene1	Veneziana de tábuas verticais
		E14: vene2	Veneziana de tábuas horizontais inclinadas
Ventilação	Sem ventilação	E15: vent	Ventilação natural seletiva diurna

Neste trabalho, adotou-se dois tipos de veneziana: veneziana de madeira com tábuas na vertical e veneziana de madeiras horizontais inclinadas, muito utilizadas nas residências da França.

As venezianas foram modeladas em todas as aberturas das fachadas sudoeste e sudeste, com funcionamento apenas quando o padrão de uso permite. A porta janela da fachada noroeste da sala não recebe veneziana, pois já recebe sombreamento do beiral do telhado. O dispositivo de sombreamento adotado foi *Exterior Blind* (veneziana horizontal) de madeira, na cor marrom, com refletância solar de 0,3, condutividade de 0,13 (W/m.K) e espessura de 1cm.

A veneziana de tábuas verticais (Figura 10) possui madeiras com dimensões de 6 cm de largura, 1 cm de espessura e separação de 0,1 cm.

Figura 10 - Veneziana de tábuas verticais



A veneziana com tábuas horizontais inclinadas possui tiras de 5 cm de largura, 1 cm de espessura, separação de 2 cm e são inclinadas em 45°. A Tabela 9 apresenta as características das aberturas de vidro do modelo com venezianas.

Figura 11 - Veneziana de tábuas horizontais inclinadas



Tabela 9 - Características das aberturas de vidro com venezianas.

Componente	Composição	U [W/m²K]	Fator Solar
Janela deslizante com veneziana	Vidro duplo com gás argônio	1,40	0,50
	Veneziana madeira	1,20	0,123
Porta abertura francesa com veneziana	Vidro duplo com gás argônio	1,40	0,51
	Veneziana madeira	1,20	0,123

O sombreamento das aberturas foi modelado através de um padrão de uso que controla o funcionamento de sombreamento de acordo com o período do ano e orientação da fachada. O padrão de uso do funcionamento durante o ano de todas as venezianas está detalhado na Tabela 10.

Tabela 10 – Padrão de uso da veneziana.

Período/Fachada	Horário	Estado
30/09-30/04 Todas as fachadas	07h-22h	Aberta
	22h-07h	Fechada
30/04-30/09 Fachada sudeste	07h-08h	Aberta
	08h-13h	Fechada
	13h-22h	Aberta
	22h-07h	Fechada
30/04-30/09 Fachada sudoeste	07h-13h	Aberta
	13h-18h	Fechada
	18h-22h	Aberta
	22h-07h	Fechada

A ventilação natural foi modelada com base no manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus (PEREIRA et al, 2013). A estratégia foi modelada para todas as zonas do pavimento superior que apresentam mais que uma abertura. A Tabela 11 apresenta as zonas em que foram consideradas a ventilação natural.

Tabela 11 – Zonas térmicas ventiladas

Zonas térmicas ventiladas
Dormitório 1
Dormitório 2
Escritório
Banho
Corredor
Cozinha
Adega
Hall
Sala

Foi modelada uma ventilação com tipo de controle *Temperature*, que permite abrir as janelas conforme os critérios de temperatura descritos: quando a temperatura do ar do ambiente é igual ou superior à temperatura de *setpoint* ($T_{int} \geq T_{setpoint}$) estabelecida por uma Schedule;

também quando a temperatura do ar interno é superior à externa ($T_{int} \geq T_{ext}$) e quando o padrão de uso permitir a ventilação na edificação. A Temperatura de controle foi estabelecida em 20°C e o padrão de uso permite ventilação no período de verão (30/04 a 20/09). Nesse padrão de ventilação as portas internas dos dormitórios permanecem abertas das 07h às 22h, as demais portas internas permanecem abertas durante as 24 horas do dia e a porta do hall de entrada fica fechada por todo período.

O padrão de uso do funcionamento da ventilação natural durante o verão ocorre no período de ocupação da edificação e está detalhado na Tabela 12.

Tabela 12 – Padrão de uso ventilação natural

Abertura	Horário	Funcionamento (%)
Aberturas externas	06h-08h	100
	08h-14h	0
	14h-22h	100
	22h-07h	0

As propriedades da ventilação natural através das aberturas foram modeladas para 3 tipos de abertura: janela, porta e porta deslizante.

Primeiramente, as estratégias serão aplicadas ao caso base individualmente, e em seguida, as melhores alternativas serão combinadas e analisadas.

O modelo de ventilação natural do programa EnergyPlus assume que a passagem de ar através da janela não é afetada pela presença de um dispositivo de sombreamento, tal como, uma persiana ou veneziana. Então, ao combinar a ventilação natural com a veneziana, em alguns horários a ventilação natural poderá ser reduzida pelo fechamento das venezianas (Tabela 13).

Tabela 13 - Padrão de uso ventilação natural reduzida pelo uso de venezianas

Abertura	Horário	Funcionamento (%)
Janelas externas sem veneziana	00h-24h	100
Porta janela da sala	06h-08h	100
	08h-14h	0
	14h-22h	100
	22h-07h	0
Aberturas com veneziana na fachada sudeste	06h-07h	reduzida
	07h-08h	100
	08h-14h	0
	14h-22h	100
	22h-06h	0
Aberturas com veneziana na fachada sudoeste	06h-07h	reduzida
	07h-08h	100
	08h-14h	0
	14h-18h	reduzida
	18h-22h	100
	22h-06h	0

3.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados serão analisados por meio da carga térmica de aquecimento anual da residência e das temperaturas internas, com os graus-hora de sobreaquecimento. A variável de carga térmica de aquecimento reporta a entrada de aquecimento para o sistema radiante garantir a condição térmica exigida para as zonas e será analisada em KWh/m²ano. Os graus-hora de sobreaquecimento serão analisados pelo somatório da diferença de temperatura horária, quando ela se encontra acima de uma temperatura base, que neste trabalho foi considerada em 26°C.

Os valores de carga térmica de aquecimento e de graus-hora acima de 26°C são analisados para o período de simulação durante o ano inteiro.

As temperaturas serão analisadas nas zonas de permanência prolongada: a sala e um dos dormitórios. A sala possui fachadas com aberturas orientadas à Noroeste e Sudoeste e o dormitório possui fachadas com aberturas orientadas à Sudeste e Sudoeste.

Os resultados serão apresentados em forma de gráficos e tabelas e análises comparativas serão realizadas entre o caso base e a aplicação das estratégias individuais e posteriormente com combinações das estratégias para definir a melhor combinação de estratégias para a melhoria da eficiência termo-energética da edificação

4 RESULTADOS

Na primeira parte deste capítulo são apresentados os resultados referentes ao caso base. O valor de carga térmica de aquecimento anual e as temperaturas internas da edificação são analisadas durante o verão e durante a semana mais quente do ano de acordo com o arquivo climático da cidade de Grenoble. A quantidade de graus-hora acima de 26°C nas zonas analisadas também é analisada.

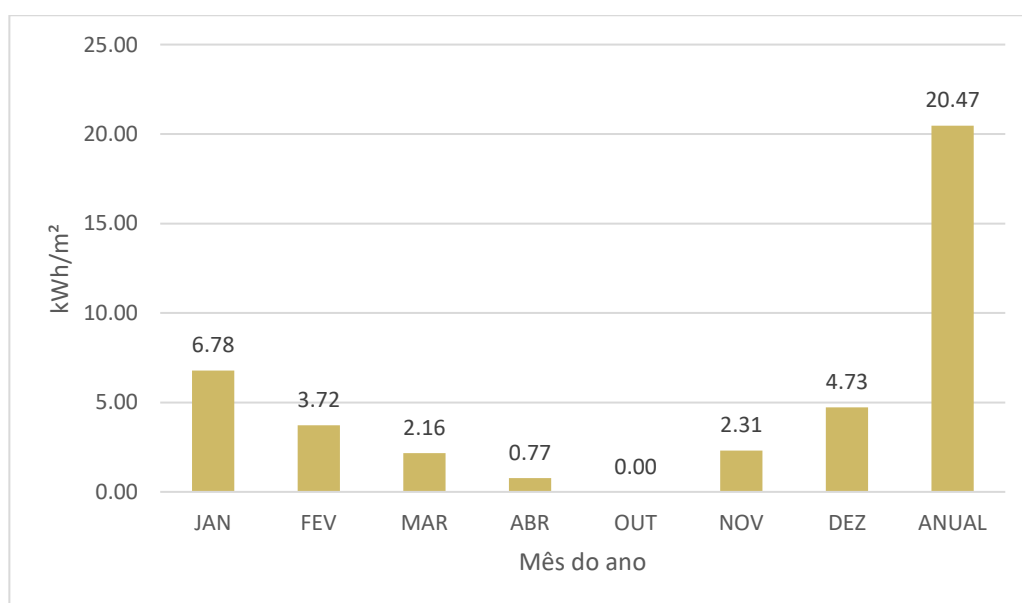
As temperaturas serão analisadas na sala e um dos dormitórios, por serem zonas de permanência prolongada. A sala possui fachadas com aberturas orientadas à Noroeste e Sudoeste e o dormitório possui fachadas com aberturas orientadas à Sudeste e Sudoeste.

Após a avaliação do caso base, inicia-se a apresentação dos resultados da aplicação das estratégias para melhorar a eficiência termo-energética da edificação: alteração da transmitância, capacidade térmica e absorvância da parede externa e cobertura, adição de sombreamento nas aberturas e de uma estratégia de ventilação.

4.1 CASO BASE

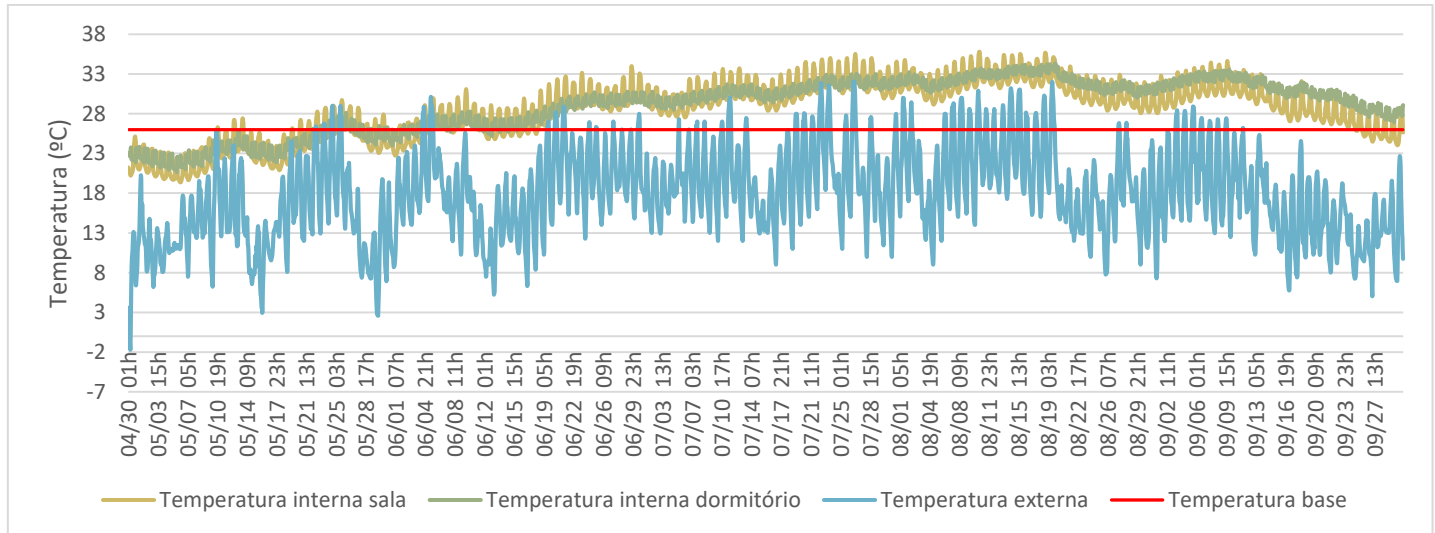
Ao longo do período de inverno (30/09 a 30/04) os resultados da carga térmica anual de aquecimento são apresentados na Figura 12. A carga térmica anual de aquecimento é de 20,47 kWh/m². Observa-se que os meses de dezembro e janeiro apresentam os maiores valores de carga térmica de aquecimento.

Figura 12 – Carga térmica anual de aquecimento – CASO BASE



A Figura 13 apresenta a evolução da temperatura do ar da sala e do dormitório analisado do caso base, ao longo do período de 30/04 a 30/09, considerado o período verão. Também são indicados no gráfico a temperatura exterior e a temperatura limite base (utilizada para analisar os graus-hora).

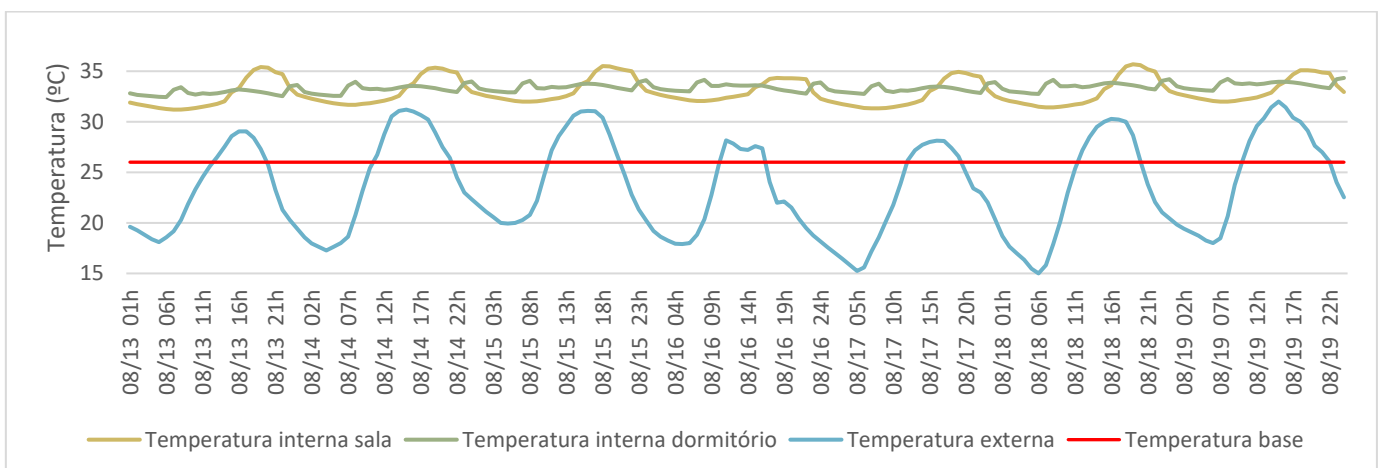
Figura 13 - Temperaturas no verão - Caso base



Nos dois ambientes, grande parte dos valores horários de temperatura interna estão acima do valor da temperatura externa, ou seja, as zonas armazenam calor, recebido pelos ganhos solares por meio da envoltória da edificação e dos seus ganhos internos, gerando períodos de sobreaquecimento na edificação, onde as temperaturas horárias internas se encontram acima de 26°C.

De acordo com o arquivo climático da cidade de Grenoble, a temperatura externa máxima anual é de 32°C e ocorre às 15h do dia 19 de agosto. Nesse horário, os valores de temperatura interna dos cômodos da residência estão acima do valor da temperatura externa, como pode ser observado através da Figura 14.

Figura 14 - Temperaturas na semana mais quente do verão - Caso base

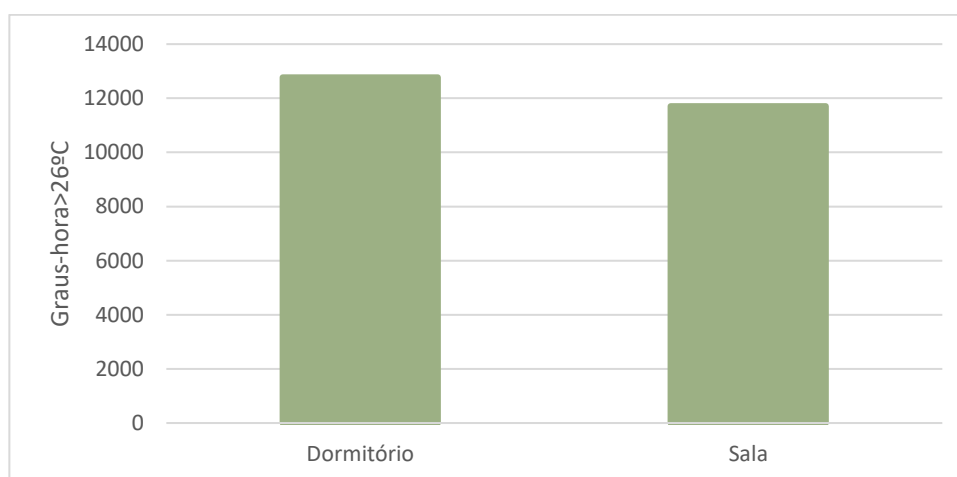


A sala apresenta maior amplitude de temperatura e temperaturas máximas mais altas, pois possui três paredes voltadas ao exterior, com janelas voltadas a 2 orientações críticas e possui cobertura com baixa capacidade térmica, o que a faz receber grande insolação durante o dia, mas também perder o calor mais facilmente durante à noite. As temperaturas internas da sala começam a aumentar quando a fachada sudoeste começa a receber radiação e aumenta com mais intensidade assim que a fachada noroeste começa a receber radiação e começa a ter ocupação. Quando essa zona não recebe mais radiação, as temperaturas começam a diminuir.

As temperaturas internas do dormitório não apresentam muita diferença durante o dia. Assim que a zona começa a receber radiação, a temperatura começa a subir; e quando a zona é desocupada ocorre uma pequena queda na temperatura, que sobe novamente assim que a zona recebe ocupação.

A Figura 15 apresenta a quantidade de graus-hora que estão acima de 26°C durante o ano, para o Caso base.

Figura 15 – Graus-hora – Caso base



Na sala, 75% das horas do período de verão encontram-se acima de 26°C, sendo que o ambiente possui 11709 graus-hora e no dormitório a porcentagem é de 78%, com 12773 graus-hora.

O dormitório apresenta uma maior quantidade de graus-hora, porém a sala apresenta a temperatura mais elevada durante o dia, pois possui fachada orientada à oeste; e menor temperatura durante a noite, pois nesse período o ambiente não recebe ocupação, ao contrário do dormitório, e suas grandes aberturas podem fazer com que o calor seja expulso mais facilmente durante à noite.

As estratégias aplicadas neste trabalho terão o objetivo de melhorar a eficiência termo-energética da edificação durante o ano inteiro, reduzindo o sobreaquecimento das zonas de

permanência prolongada no verão, e se possível reduzir a carga térmica de aquecimento da edificação.

4.2 ESTRATÉGIAS PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA TERMO-ENERGÉTICA

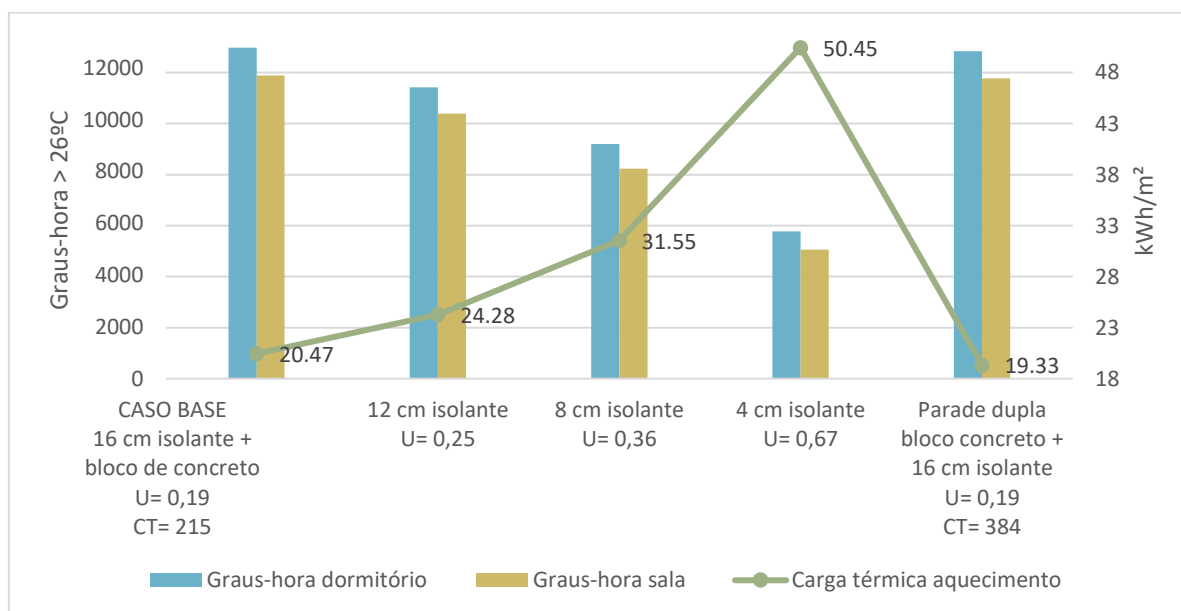
A análise dos grau-hora do Caso base mostrou que existem muitos períodos de sobreaquecimento na edificação. Elementos com a baixa transmitância térmica e o valor de absorptância das superfícies ou a falta de sombreamento das aberturas podem ser responsáveis por essa situação. A influência dos valores desses parâmetros, além da adição de outras estratégias, descritos na metodologia foi analisada através dos resultados das simulações.

A seguir são apresentados os resultados de carga térmica e graus- hora anuais para a alteração da transmitância, capacidade térmica e absorptância da parede externa e cobertura, da adição de sombreamento nas aberturas e de uma estratégia de ventilação.

4.2.1 Parede externa

A Figura 16 apresenta os resultados anuais para a simulação de diferentes níveis de isolamento da parede exterior do Caso base, ou seja, variando os valores da transmitância térmica, e também variando a capacidade térmica.

Figura 16 – Resultados alternativas de parede



Na medida em que se aumenta o valor da transmitância térmica das paredes, diminui-se a quantidade de graus-hora acima de 26°C dos ambientes. Porém, observando os valores de carga térmica de aquecimento, a relação é oposta, ou seja, aumentando o valor da transmitância térmica das paredes, a carga térmica de aquecimento aumenta. Dessa forma, a utilização de

isolante nas paredes favorece a edificação durante o inverno, impedindo o fluxo de calor do interior para o exterior. Porém, piora o desempenho dos cômodos no período de calor.

Comparando o caso com valor mais baixo de transmitância térmica da parede (Caso base com $U: 0,19\text{W/m}^2\text{K}$) e o caso com o valor mais alto ($U: 0,67\text{W/m}^2\text{K}$), obtém-se uma redução na quantidade de graus-hora acima de 26°C de 57% para a sala e 55% para o dormitório. Por outro lado, obtém-se um acréscimo na carga térmica de aquecimento de 147%, tornando inviável uma redução significativa no nível de isolamento neste caso.

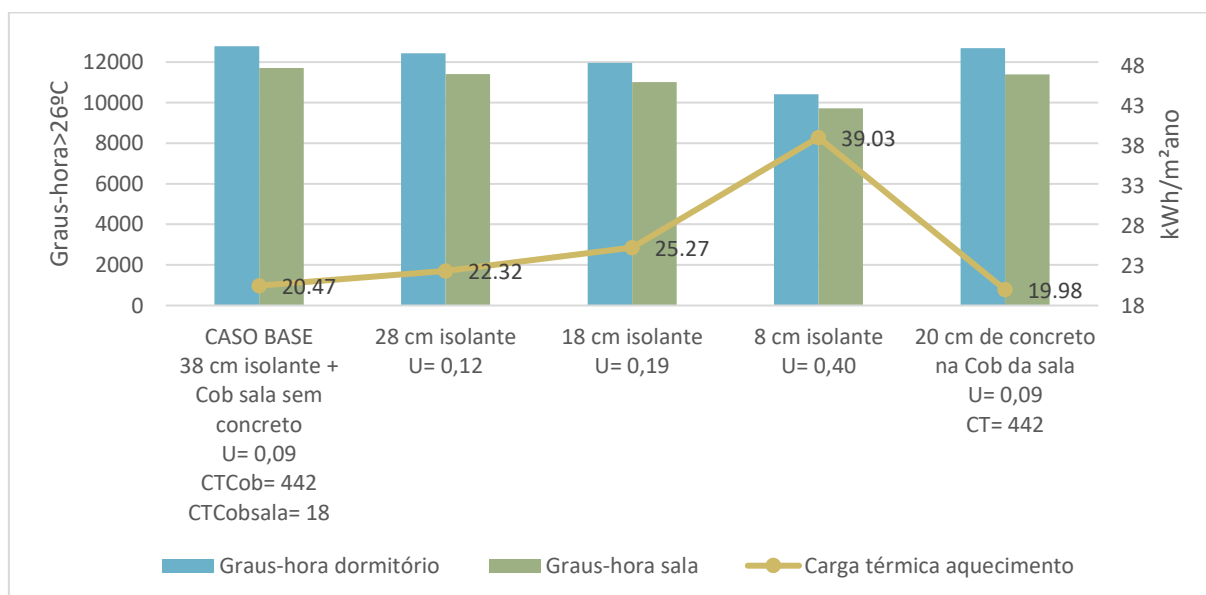
Já com o aumento da capacidade térmica da parede externa, há uma pequena redução na quantidade de graus-hora acima de 26°C e na carga térmica de aquecimento, sendo favorável para a edificação durante o ano inteiro.

Comparando o caso base (CT: $215\text{kJ/m}^2\text{K}$) com o caso onde o valor da capacidade térmica da parede é alterado (CT: $384\text{kJ/m}^2\text{K}$), a redução na quantidade de graus-hora acima de 26°C é de 1% para a sala e para o dormitório. A carga térmica de aquecimento é reduzida em 6%. Os valores não apresentam muita variação, porém se mostra uma boa alternativa por ser favorável durante o ano inteiro, reduzindo o sobreaquecimento e a carga térmica de aquecimento.

4.2.2 Cobertura

Os resultados da variação dos valores da transmitância térmica da cobertura da edificação e da capacidade térmica da cobertura da sala são apresentados na Figura 17.

Figura 17 – Resultados alternativas de cobertura



Aumentando o valor da transmitância térmica da cobertura, diminui-se a quantidade de graus-hora acima de 26°C dos ambientes e aumenta a carga térmica de aquecimento, da mesma forma que ocorreu com a variação da transmitância térmica da parede, porém as variáveis de graus-hora e carga térmica tiveram uma variação menor quando comparados com os resultados da parede.

Comparando o caso base ($U: 0,09\text{W/m}^2\text{K}$) e o caso com a cobertura menos isolada ($U: 0,40\text{W/m}^2\text{K}$), obtém-se uma redução na quantidade de graus-hora acima de 26°C de 17% para a sala e 19% para o dormitório. O acréscimo na carga térmica de aquecimento é de 91%.

Com o aumento da capacidade térmica da cobertura da sala, adicionando 20cm de concreto, como na cobertura dos outros ambientes da edificação, há uma redução na quantidade de graus-hora acima de 26°C neste ambiente e na carga térmica de aquecimento.

Comparando o caso base ($CT_{\text{sala}}: 18\text{kJ/m}^2\text{K}$) com o caso onde o valor da capacidade térmica da cobertura da sala é alterado ($CT: 442\text{kJ/m}^2\text{K}$), a redução na quantidade de graus-hora acima de 26°C é de 3% para a sala. A carga térmica de aquecimento é reduzida em 2%. A mudança da capacidade térmica da cobertura teve mais influência nos grau-hora da sala do que a mudança da capacidade térmica da parede, mas em relação à carga térmica, a variação da parede tem maior impacto.

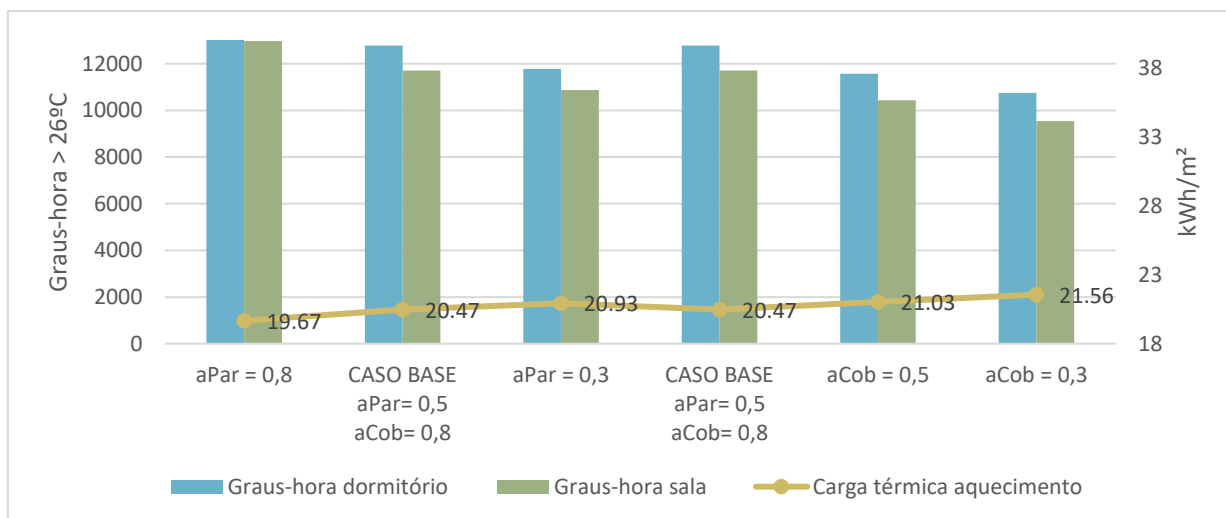
4.2.3 Absortância solar

A Figura 18 apresenta os resultados para a variação dos valores de absortância da parede externa e da cobertura.

Ao se diminuir o valor da absortância da parede e cobertura, a quantidade de graus-hora acima de 26°C também diminui, enquanto que ocorre um pequeno acréscimo na carga térmica de aquecimento. Portanto, a utilização de cores claras nas superfícies favorece o dormitório e a sala durante o período de calor, porém piora o desempenho da edificação no inverno.

Variando a absortância da parede, ao se comparar o caso que apresenta a cor mais escura ($\alpha: 0,8$) e que apresenta a cor mais clara ($\alpha: 0,3$), a quantidade de graus-hora acima de 26°C é reduzida em 16% na sala e 17,5% no dormitório e há um acréscimo de 6% na carga térmica de aquecimento. No caso da cobertura, a quantidade de graus-hora acima de 26°C reduz em 18,5% na sala e 16% no dormitório e há um acréscimo de 5% na carga térmica de aquecimento. A alteração da absortância solar das superfícies apresentou uma variação baixa dos resultados em relação ao Caso base.

Figura 18 – Resultados alternativas de absortância solar

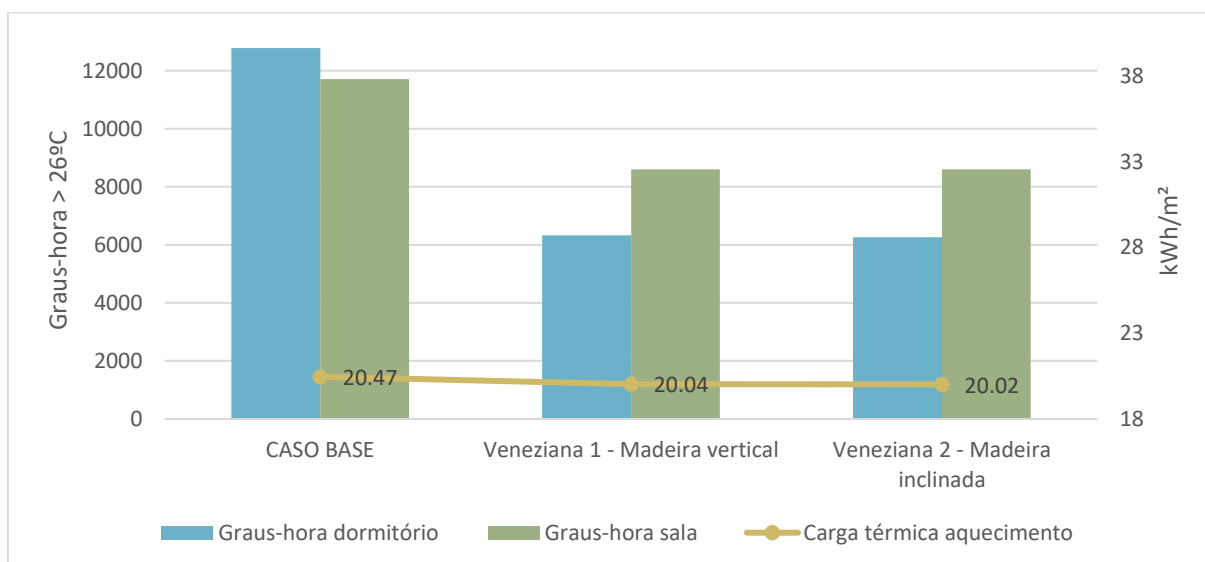


4.2.4 Sombreamento

A Figura 19 traz os resultados da simulação com a adição de dois tipos de venezianas nas aberturas das fachadas sudoeste e sudeste.

Como no inverno, o sombreamento das aberturas ocorre apenas durante a noite, o valor de carga térmica de aquecimento não sofre muita variação.

Figura 19 – Resultados alternativas de venezianas



No período de calor, quando as janelas são sombreadas, ocorre uma redução significativa na quantidade de graus-hora acima de 26°C nos dois ambientes, devido a diminuição do ganho de calor com o impedimento da incidência direta de radiação. Com a adição da veneziana de madeira com tábuas verticais houve uma redução nos graus-hora de

27% na sala e de 51% no dormitório. E a veneziana de madeira com tabuas horizontais inclinadas apresentou comportamento semelhante à anterior.

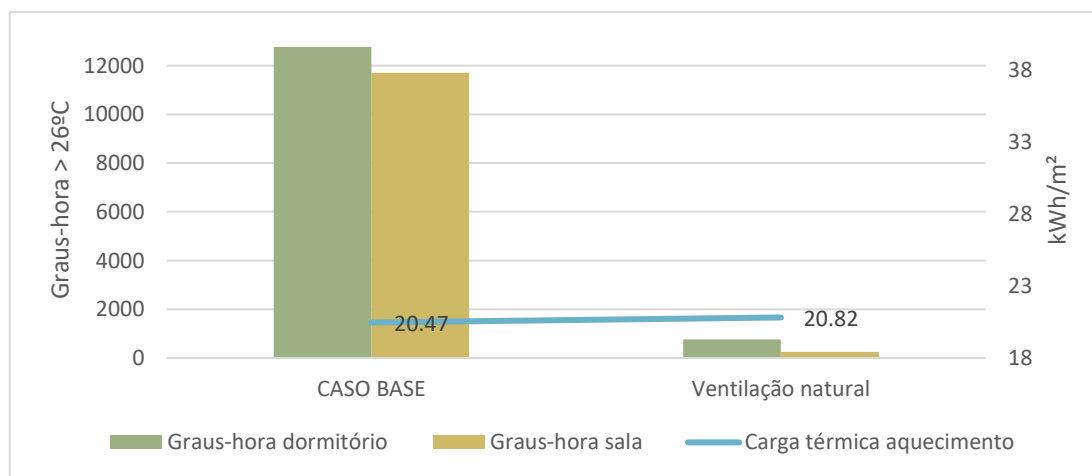
Observa-se que a utilização do sombreamento tem impacto maior no desempenho do dormitório. Isso porque no dormitório, as duas aberturas foram sombreadas, enquanto na sala somente a menor abertura foi sombreada, pois a sua maior abertura localizada na sacada já era sombreada pelo beiral do telhado.

Conclui-se que os dois elementos são muito favoráveis para a edificação e podem auxiliar no objetivo de reduzir o sobreaquecimento dos ambientes.

4.2.5 Ventilação natural

A Figura 20 apresenta os resultados com a adição de uma ventilação natural cruzada à edificação, que tem funcionamento no período de verão (30/04 a 30/09). As janelas são abertas das 06h às 08h e das 14h às 22h, quando a temperatura do ar do ambiente é igual ou superior à temperatura de 20°C.

Figura 20 – Resultados ventilação natural



As janelas e as portas externas permanecem fechadas durante o inverno. Nesse período somente pode ocorrer infiltração de ar para o interior dos ambientes através das frestas das portas e janelas. Por isso a pequena variação no valor de carga térmica.

No período de calor, ocorre uma grande redução na quantidade de graus-hora acima de 26°C nos dois ambientes, devido à remoção do calor pela aceleração das trocas por convecção. A redução nos graus-hora é de 98% na sala e de 94% no dormitório. Pode se observar que o impacto da ventilação foi um pouco maior na sala, já que esse ambiente possui aberturas maiores.

A Tabela 14 apresenta os resultados das simulações paramétricas.

Tabela 14 – Resultados das aplicações individuais das estratégias no caso base

Estratégia	Carga térmica aquecimento (kWh/m²)		Sala			Dormitório		
			Graus-hora >26°C	% horas do ano >26°C		Graus-hora >26°C	% horas do ano >26°C	
CASO BASE Parede 16 cm isolante + bloco de concreto α : 0,5 U: 0,19 CT: 215 Cobertura 38 cm de isolante + 20 cm de concreto α : 0,8 U: 0,09 CT: 442 CTCobsala: 18	20,47	Diferença (%)	11709,45	31.75%	Diferença (%)	12773,41	33.07%	Diferença (%)
Parede 12 cm isolante U: 0,25	24,28	+19%	10228,95	30.40%	-12,6%	11251,67	31.67%	-12%
Parede 8 cm isolante U: 0,36	31,55	+54%	8104,22	28.03%	-30,8%	9054,95	28.88%	-29%
Parede 4 cm isolante U: 0,67	50,45	+147%	4983,70	22.50%	-57,4%	5691,19	26.00%	-55%
Parede dupla bloco concreto CT: 384	19,33	-6%	11595,25	31.47%	-1,0%	12637,96	32.19%	-1%
Cobertura 28 cm isolante U: 0,12	22,32	+9%	11410,08	31.45%	-2,6%	12426,61	32.80%	-3%
Cobertura 18 cm isolante U: 0,19	25,27	+23%	11006,09	30.97%	-6,0%	11961,97	32.48%	-6%
Cobertura 8 cm isolante U: 0,40	39,03	+91%	9716,00	28.86%	-17,0%	10415,61	30.51%	-18%
20 cm concreto na cobertura da sala CT: 442	19,98	-2%	11385,68	31.04%	-2,8%	12690,01	32.89%	-1%
α parede: 0,8	19,67	-4%	12971,98	32.89%	+10,8%	14266,03	34.02%	+12%
α parede: 0,3	20,93	+2%	10868,43	30.98%	-7,2%	11775,23	32.03%	-8%
α cobertura: 0,5	21,03	+3%	10431,46	30.73%	-10,9%	11575,34	31.82%	-9%
α cobertura: 0,3	21,56	+5%	9534,92	30.13%	-18,6%	10753,97	30.64%	-16%
Veneziana 1 - Madeira vertical	20,04	-2%	8601,89	28.90%	-26,5%	6323,82	27.27%	-50%
Veneziana 2 - Madeira inclinada	20,02	-2%	8597,95	28.86%	-26,6%	6262,40	27.20%	-51%
Ventilação natural	20,82	2%	256,55	3.38%	-97,8%	767,59	7.96%	-94%

De acordo com os resultados das simulações com as estratégias aplicadas individualmente, as estratégias que mais reduziram os graus-hora de sobreaquecimento foram a adição de uma ventilação natural e de sombreamento por veneziana e o aumento da transmitância térmica da parede, diminuindo a espessura do isolante de 16 cm para 4 cm. A adição da ventilação natural e do sombreamento por veneziana também tiveram um bom desempenho no inverno e a variação da transmitância térmica da parede resultou em um acréscimo muito alto na carga térmica de aquecimento.

Os resultados mostraram que a redução muito alta no nível de isolamento é inviável neste caso de uma edificação residencial que apresenta cargas internas baixas, pois mesmo sendo eficaz no período de calor, eliminando uma parcela dos graus-hora de sobreaquecimento, o acréscimo na carga térmica de aquecimento é muito alto, anulando o objetivo de melhoria da eficiência energética da edificação.

Com relação a carga térmica de aquecimento, as estratégias que foram mais favoráveis são o aumento da capacidade térmica da parede, adicionando uma camada de bloco de concreto e o aumento da absorvância solar da parede de 0,5 para 0,8. O aumento da capacidade térmica da parede também reduziu os graus-hora acima de 26°C e o aumento da absorvância da parede resultou em um pequeno acréscimo dos graus-hora acima de 26°C.

4.2.6 Combinações das estratégias

De acordo com os resultados individuais das estratégias, optou-se em combinar algumas estratégias com o objetivo de melhorar a eficiência termo-energética da edificação durante o ano inteiro, reduzindo o sobreaquecimento das zonas de permanência prolongada, e se possível também reduzindo a carga térmica de aquecimento da edificação.

A partir dos resultados, optou-se em criar um Caso base 1, adicionando todas as estratégias que apresentaram resultados favoráveis em relação aos valores de graus-hora de sobreaquecimento e de carga térmica de aquecimento (variação da capacidade térmica das paredes externas da edificação e cobertura da sala, e sombreamento por veneziana) e também a ventilação natural, por ter sido a estratégia mais favorável em relação aos valores de graus-hora de sobreaquecimento, quase eliminando por completo os graus-hora acima de 26°C do Caso base. Optou-se por combinar com o Caso base 1 somente as estratégias que tiveram seus resultados no máximo 20% desfavoráveis em relação ao Caso base. Como os resultados dos dois tipos de venezianas foram muito similares, a veneziana de madeira com tabuas horizontais inclinadas será utilizada nas combinações, pois apresenta maior área de ventilação que a outra

veneziana. Ao combinar a ventilação natural com a veneziana, a ventilação será reduzida com o fechamento das venezianas. A Tabela 15 apresenta as combinações (CE) das estratégias aplicadas à edificação.

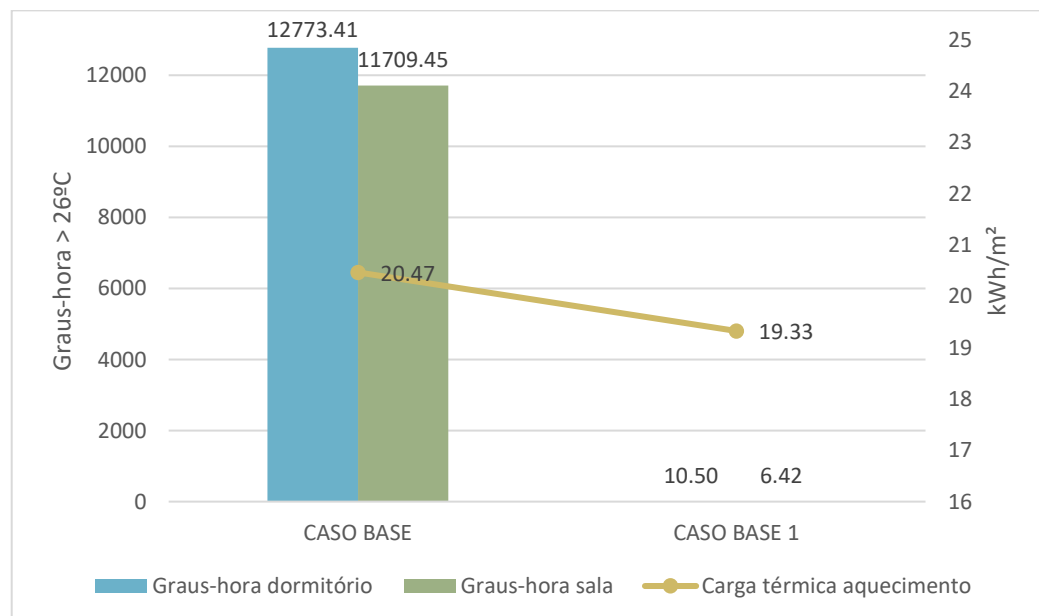
Tabela 15 – Combinações das estratégias

Combinação de Estratégias	Parede	Cobertura	Veneziana	Ventilação
Caso base	U= 0,19 W/m ² K CT= 215 kJ/m ² K α parede: 0,5	U= 0,19 W/m ² K CT= 442 kJ/m ² K CTsala= 18 kJ/m ² K α cobertura: 0,8	Não	Não
Caso base 1	E4: CTpar U= 0,19 W/m ² K CT= 384 kJ/m ² K α parede: 0,5	E8: CTcob U= 0,19 W/m ² K CT= 442 kJ/m ² K CTsala= 442 kJ/m ² K α cobertura: 0,8	E14: Vene 2	E15: Vent
CE2	E4 + E1: CTpar= 384 kJ/m ² K + U1par= 0,25 W/m ² K	E8: CTcob= 442 kJ/m ² K	E14: Vene 2	E15: Vent
CE3	E4 + E1 + E9: CTpar= 384 kJ/m ² K + U1par= 0,25 W/m ² K + α 1par= 0,8	E8: CTcob= 442 kJ/m ² K	E14: Vene 2	E15: Vent
CE4	E4 + E9: CTpar= 384 kJ/m ² K + α 1par= 0,8	E8: CTcob= 442 kJ/m ² K	E14: Vene 2	E15: Vent
CE5	E4 + E10: CTpar= 384 kJ/m ² K + α 2par= 0,3	E8: CTcob= 442 kJ/m ² K	E14: Vene 2	E15: Vent
CE6	E4: CTpar= 384 kJ/m ² K	E8 + E5: CTcob= 442 kJ/m ² K + U1cob= 0,25 W/m ² K	E14: Vene 2	E15: Vent
CE7	E4 + E9: CTpar= 384 kJ/m ² K + α 1par= 0,8	E8 + E5: CTcob= 442 kJ/m ² K + U1cob= 0,25 W/m ² K	E14: Vene 2	E15: Vent
CE8	E4 + E10: CTpar= 384 kJ/m ² K + α 2par= 0,3	E8 + E5: CTcob= 442 kJ/m ² K + U1cob= 0,25 W/m ² K	E14: Vene 2	E15: Vent
CE9	E4: CTpar= 384 kJ/m ² K	E8 + E5 + E11 CTcob= 442 kJ/m ² K + U1cob= 0,25 W/m ² K + α 1cob= 0,5	E14: Vene 2	E15: Vent
CE10	E4 + E9: CTpar= 384 kJ/m ² K + α 1par= 0,8	E8 + E5 + E11 CTcob= 442 kJ/m ² K + U1cob= 0,25 W/m ² K + α 1cob= 0,5	E14: Vene 2	E15: Vent
CE11	E4 + E10: CTpar= 384 kJ/m ² K + α 2par= 0,3	E8 + E5 + E11 CTcob= 442 kJ/m ² K + U1cob= 0,25 W/m ² K + α 1cob= 0,5	E14: Vene 2	E15: Vent
CE12	E4: CTpar= 384 kJ/m ² K	E8 + E5 + E12 CTcob= 442 kJ/m ² K + U1cob= 0,25 W/m ² K + α 2cob= 0,3	E14: Vene 2	E15: Vent

CE13	E4 + E9: $CT_{par}= 384 \text{ kJ/m}^2\text{K} + \alpha_{1par}= 0,8$	E8 + E5 + E12 $CT_{cob}= 442 \text{ kJ/m}^2\text{K} + U_{1cob}= 0,25 \text{ W/m}^2\text{K} + \alpha_{2cob}= 0,3$	E14: Vene 2	E15: Vent
CE14	E4 + E10: $CT_{par}= 384 \text{ kJ/m}^2\text{K} + \alpha_{2par}= 0,3$	E8 + E5 + E12 $CT_{cob}= 442 \text{ kJ/m}^2\text{K} + U_{1cob}= 0,25 \text{ W/m}^2\text{K} + \alpha_{2cob}= 0,3$	E14: Vene 2	E15: Vent
CE15	E4: $CT_{par}= 384 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	E8 + E11: $CT_{cob}= 442 \text{ kJ/m}^2\text{K} + \alpha_{1cob}= 0,5$	E14: Vene 2	E15: Vent
CE16	E4 + E9: $CT_{par}= 384 \text{ kJ/m}^2\text{K} + \alpha_{1par}= 0,8$	E8 + E11: $CT_{cob}= 442 \text{ kJ/m}^2\text{K} + \alpha_{1cob}= 0,5$	E14: Vene 2	E15: Vent
CE17	E4 + E10: $CT_{par}= 384 \text{ kJ/m}^2\text{K} + \alpha_{2par}= 0,3$	E8 + E11: $CT_{cob}= 442 \text{ kJ/m}^2\text{K} + \alpha_{1cob}= 0,5$	E14: Vene 2	E15: Vent
CE18	E4: $CT_{par}= 384 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	E8 + E12 $CT_{cob}= 442 \text{ kJ/m}^2\text{K} + \alpha_{2cob}= 0,3$	E14: Vene 2	E15: Vent
CE19	E4 + E9: $CT_{par}= 384 \text{ kJ/m}^2\text{K} + \alpha_{1par}= 0,8$	E8 + E12 $CT_{cob}= 442 \text{ kJ/m}^2\text{K} + \alpha_{2cob}= 0,3$	E14: Vene 2	E15: Vent
CE20	E4 + E10: $CT_{par}= 384 \text{ kJ/m}^2\text{K} + \alpha_{2par}= 0,3$	E8 + E12 $CT_{cob}= 442 \text{ kJ/m}^2\text{K} + \alpha_{2cob}= 0,3$	E14: Vene 2	E15: Vent

A Figura 21 traz os resultados do Caso base e Caso base 1.

Figura 21 – Resultados Caso Base e Caso base 1



Assim como seu desempenho individualmente, as estratégias combinadas são favoráveis para a edificação durante o ano inteiro.

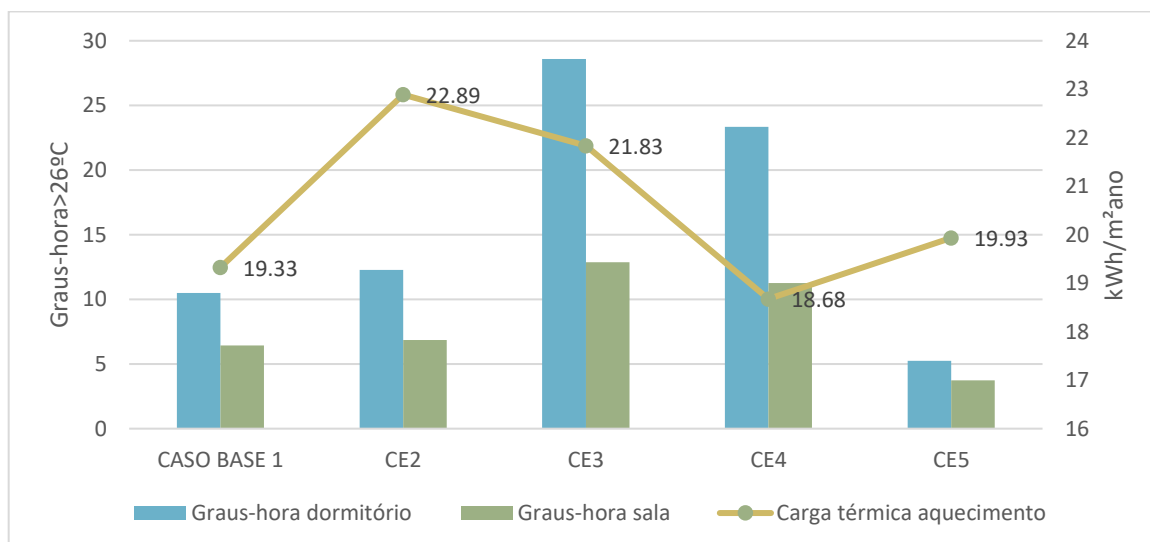
Comparando o Caso base com o Caso base 1, a redução na quantidade de graus-hora acima de 26°C é de 99,95% para a sala e de 99,92% para o dormitório, sendo que apenas 21 horas do ano apresentam sobreaquecimento na sala e 37 horas no dormitório. A carga térmica de aquecimento é reduzida em 6%.

A Figura 22 apresenta os resultados de algumas combinações de estratégias aplicadas à parede externa da edificação (Tabela 16).

Tabela 16 – Combinações 2, 3, 4 e 5

Combinação	Parede	Cobertura	Veneziana	Ventilação
Caso base 1	E4: CT _{par} U= 0,19 W/m ² K CT= 384 kJ/m ² K α parede: 0,5	E8: CT _{cob} U= 0,19 W/m ² K CT= 442 kJ/m ² K CT _{sala} = 442 kJ/m ² K α cobertura: 0,8	E14: Vene 2	E15: Vent
CE2	E4 + E1: CT _{par} = 384 kJ/m ² K + U _{1par} = 0,25 W/m ² K	E8: CT _{cob} = 442 kJ/m ² K	E14: Vene 2	E15: Vent
CE3	E4 + E1 + E9: CT _{par} = 384 kJ/m ² K + U _{1par} = 0,25 W/m ² K + α _{1par} = 0,8	E8: CT _{cob} = 442 kJ/m ² K	E14: Vene 2	E15: Vent
CE4	E4 + E9: CT _{par} = 384 kJ/m ² K + α _{1par} = 0,8	E8: CT _{cob} = 442 kJ/m ² K	E14: Vene 2	E15: Vent
CE5	E4 + E10: CT _{par} = 384 kJ/m ² K + α _{2par} = 0,3	E8: CT _{cob} = 442 kJ/m ² K	E14: Vene 2	E15: Vent

Figura 22 – Resultados combinações 2, 3, 4 e 5



De acordo com os dados da combinação 2, podemos perceber que o comportamento dos resultados com o aumento do valor da transmitância térmica da parede não apresenta o mesmo comportamento que na simulação paramétrica do Caso base. Diminuindo o nível de isolamento, a quantidade de graus-hora acima de 26°C dos ambientes aumentou, assim como o valor de carga térmica de aquecimento. Portanto, a parede com inércia térmica e menor valor de transmitância térmica, neste caso, apresenta melhor desempenho para ambos os cômodos, configurando a melhor opção.

Analisando os resultados das combinações 3, 4 e 5, se verifica que o desempenho da variação da absorptância é o mesmo de quando analisado na simulação paramétrica do Caso base. Aumentando o valor da absorptância da parede, ou seja, utilizando cores mais escuras, a quantidade de graus-hora acima de 26°C também aumenta, enquanto ocorre uma pequena redução na carga térmica de aquecimento.

A Combinação 5 se mostra mais eficiente que a combinação 1 durante o período de calor e ainda reduz a carga térmica de aquecimento em 3% em relação ao caso base.

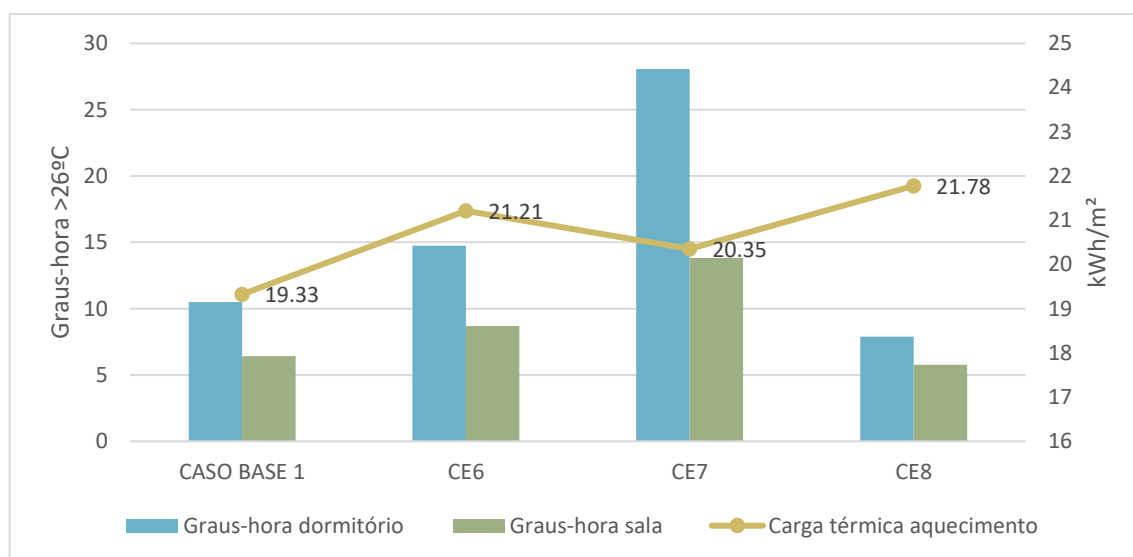
A Figura 23 traz os resultados de algumas combinações de estratégias, incluindo o aumento da transmitância da cobertura (Tabela 17).

Podemos notar que o comportamento dos resultados com o aumento do valor da transmitância térmica da cobertura é o mesmo da parede. Ao aumentar a transmitância térmica da cobertura, a quantidade de graus-hora acima de 26°C dos ambientes também aumenta.

Tabela 17 - Combinações 6, 7 e 8

Combinação	Parede	Cobertura	Veneziana	Ventilação
Caso base 1	E4: CT _{par} U= 0,19 W/m ² K CT= 384 kJ/m ² K α parede= 0,5	E8: CT _{cob} U= 0,19 W/m ² K CT= 442 kJ/m ² K CT _{sala} = 442 kJ/m ² K α cobertura= 0,8	E14: Vene 2	E15: Vent
CE6	E4: CT _{par} = 384 kJ/m ² K	E8 + E5: CT _{cob} = 442 kJ/m ² K + U _{1cob} = 0,25 W/m ² K	E14: Vene 2	E15: Vent
CE7	E4 + E9: CT _{par} = 384 kJ/m ² K + α _{1par} = 0,8	E8 + E5: CT _{cob} = 442 kJ/m ² K + U _{1cob} = 0,25 W/m ² K	E14: Vene 2	E15: Vent
CE8	E4 + E10: CT _{par} = 384 kJ/m ² K + α _{2par} = 0,3	E8 + E5: CT _{cob} = 442 kJ/m ² K + U _{1cob} = 0,25 W/m ² K	E14: Vene 2	E15: Vent

Figura 23 - Resultados combinações 6, 7 e 8



A variação das absorptâncias das paredes nas combinações 7 e 8 segue o mesmo padrão dos resultados de quando analisado na simulação paramétrica do Caso base. Diminuindo o valor da absorptância da parede, a quantidade de graus-hora acima de 26°C também reduz, enquanto ocorre um pequeno aumento na carga térmica de aquecimento.

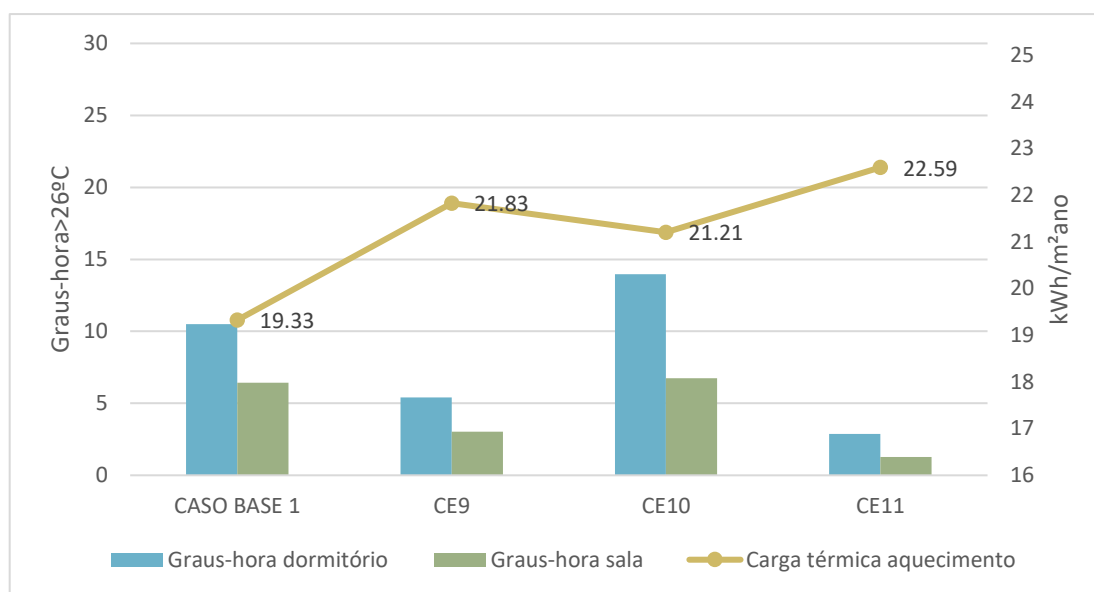
A Combinação 8 se mostra mais eficiente que o Caso base 1 durante o período de calor, porém o valor de carga térmica tem um acréscimo de 6% em relação ao caso base.

A Figura 24 apresenta os resultados de algumas combinações de estratégias, incluindo o aumento da transmitância e a variação da absorptância da cobertura (Tabela 18).

Tabela 18 - Combinações 9, 10 e 11

Combinação	Parede	Cobertura	Veneziana	Ventilação
Caso base 1	E4: CT _{par} U= 0,19 W/m²K CT= 384 kJ/m²K α parede: 0,5	E8: CT _{cob} U= 0,19 W/m²K CT= 442 kJ/m²K CT _{sala} = 442 kJ/m²K α cobertura: 0,8	E14: Vene 2	E15: Vent
CE9	E4: CT _{par} = 384 kJ/m²K	E8 + E5 + E11 CT _{cob} = 442 kJ/m²K + U _{1cob} = 0,25 W/m²K + α _{1cob} = 0,5	E14: Vene 2	E15: Vent
CE10	E4 + E9: CT _{par} = 384 kJ/m²K + α _{1par} = 0,8	E8 + E5 + E11 CT _{cob} = 442 kJ/m²K + U _{1cob} = 0,25 W/m²K + α _{1cob} = 0,5	E14: Vene 2	E15: Vent
CE11	E4 + E10: CT _{par} = 384 kJ/m²K + α _{2par} = 0,3	E8 + E5 + E11 CT _{cob} = 442 kJ/m²K + U _{1cob} = 0,25 W/m²K + α _{1cob} = 0,5	E14: Vene 2	E15: Vent

Figura 24 - Resultados combinações 9, 10 e 11



Podemos observar com os resultados da combinação 9, que aumentando a transmitância térmica quando a superfície tem uma capacidade térmica mais alta, e diminuindo a absorvância da cobertura, a quantidade de graus-hora acima de 26°C agora diminui e a combinação se torna mais eficiente que o Caso base 1 durante o período de calor, porém durante o inverno o valor de carga térmica tem um acréscimo de 7% em relação ao caso base.

A variação das absorvâncias das paredes nas combinações 10 e 11 segue o mesmo padrão dos resultados de quando analisado na simulação paramétrica do Caso base. Diminuindo o valor da absorvância da cobertura, a quantidade de graus-hora acima de 26°C também reduz, enquanto ocorre um pequeno aumento na carga térmica de aquecimento.

A Combinação 11 se mostra a mais eficiente no período de calor, porém no inverno é a menos eficiente, tendo um aumento de 10% da carga térmica em relação ao caso base.

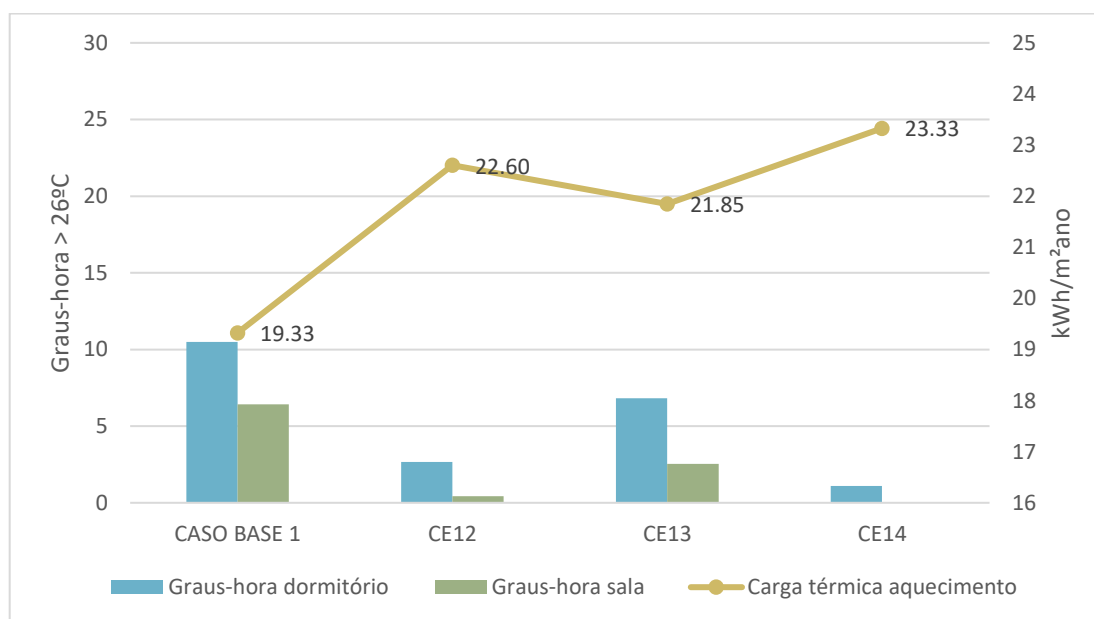
A Figura 25 apresenta os resultados de algumas combinações de estratégias, incluindo o aumento da transmitância e a variação da absorvância da cobertura (Tabela 19).

As Combinações 12, 13 e 14 seguem o mesmo padrão das combinações 9, 10 e 11, porém apresentam valores mais reduzidos de graus-hora de sobreaquecimento e valores mais altos de carga térmica, por aplicarem uma cor mais clara na cobertura.

Tabela 19 - Combinações 12, 13 e 14

Combinação	Parede	Cobertura	Veneziana	Ventilação
Caso base 1	E4: CT _{par} U= 0,19 W/m ² K CT= 384 kJ/m ² K α parede: 0,5	E8: CT _{cob} U= 0,19 W/m ² K CT= 442 kJ/m ² K CT _{sala} = 442 kJ/m ² K α cobertura: 0,8	E14: Vene 2	E15: Vent
CE12	E4: CT _{par} = 384 kJ/m ² K	E8 + E5 + E12 CT _{cob} = 442 kJ/m ² K + U _{1cob} = 0,25 W/m ² K + α 2cob= 0,3	E14: Vene 2	E15: Vent
CE13	E4 + E9: CT _{par} = 384 kJ/m ² K + α 1par= 0,8	E8 + E5 + E12 CT _{cob} = 442 kJ/m ² K + U _{1cob} = 0,25 W/m ² K + α 2cob= 0,3	E14: Vene 2	E15: Vent
CE14	E4 + E10: CT _{par} = 384 kJ/m ² K + α 2par= 0,3	E8 + E5 + E12 CT _{cob} = 442 kJ/m ² K + U _{1cob} = 0,25 W/m ² K + α 2cob= 0,3	E14: Vene 2	E15: Vent

Figura 25 - Resultados Combinações 12, 13 e 14



Todas as combinações se mostram mais eficientes no período de calor que o Caso base 1, porém no inverno, o valor de carga térmica tem um acréscimo em média de 10% em relação ao caso base.

A Figura 26 traz os resultados de algumas combinações de estratégias, incluindo a variação da absorvância da cobertura (Tabela 20).

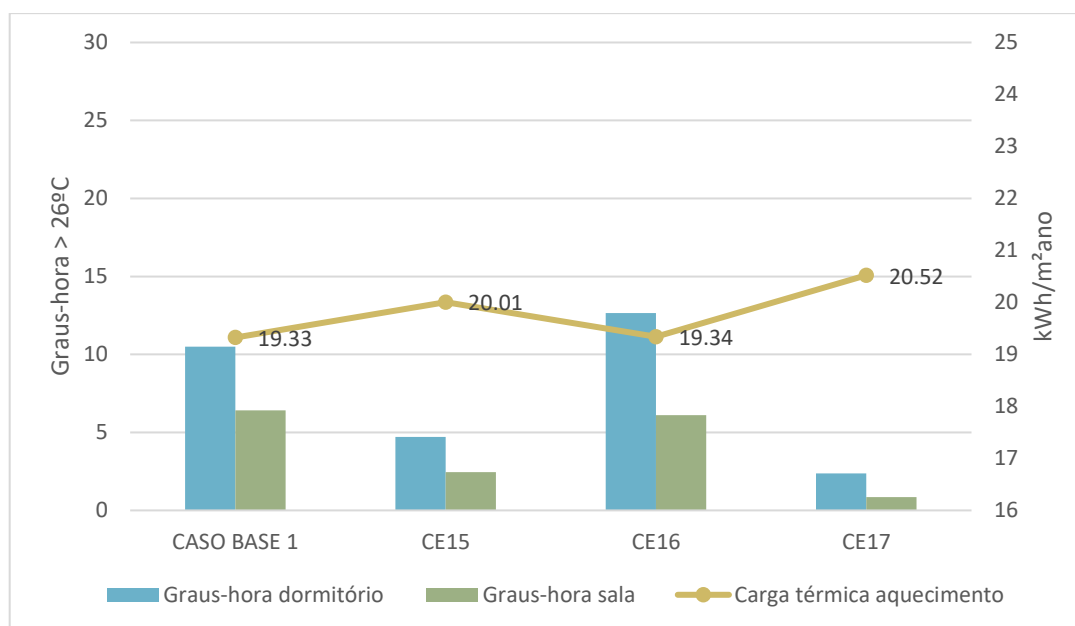
A variação das absorvâncias nas combinações 15, 16 e 17 seguem o padrão dos resultados, onde, diminuindo o valor da absorvância, ou seja, utilizando cores mais claras, a

quantidade de graus-hora acima de 26°C também diminui, enquanto ocorre um pequeno acréscimo na carga térmica de aquecimento.

Tabela 20 - Combinações 15, 16 e 17

Combinação	Parede	Cobertura	Veneziana	Ventilação
Caso base 1	E4: CT _{par} U= 0,19 W/m ² K CT= 384 kJ/m ² K α parede: 0,5	E8: CT _{cob} U= 0,19 W/m ² K CT= 442 kJ/m ² K CT _{sala} = 442 kJ/m ² K α cobertura: 0,8	E14: Vene 2	E15: Vent
CE15	E4: CT _{par} = 384 kJ/m ² K	E8 + E11: CT _{cob} = 442 kJ/m ² K + α 1cob= 0,5	E14: Vene 2	E15: Vent
CE16	E4 + E9: CT _{par} = 384 kJ/m ² K + α 1par= 0,8	E8 + E11: CT _{cob} = 442 kJ/m ² K + α 1cob= 0,5	E14: Vene 2	E15: Vent
CE17	E4 + E10: CT _{par} = 384 kJ/m ² K + α 2par= 0,3	E8 + E11: CT _{cob} = 442 kJ/m ² K + α 1cob= 0,5	E14: Vene 2	E15: Vent

Figura 26 - Resultados combinações 15, 16 e 17



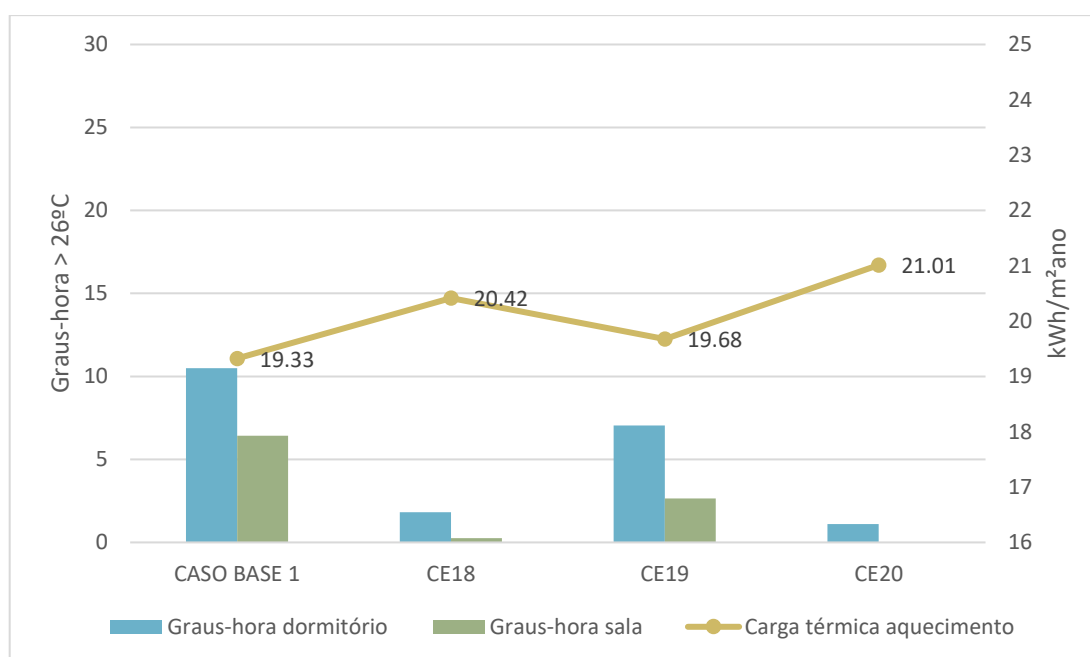
As Combinações 15 e 17 se mostram mais eficiente que o Caso base 1 durante o período de calor e ainda reduz a carga térmica de aquecimento em relação ao caso base.

A Figura 27 traz os resultados de algumas combinações de estratégias, incluindo a variação da absorvência da cobertura (Tabela 21).

Tabela 21 - Combinações 18, 19 e 20

Combinação	Parede	Cobertura	Veneziana	Ventilação
Caso base 1	E4: CT _{par} U= 0,19 W/m ² K CT= 384 kJ/m ² K α parede: 0,5	E8: CT _{cob} U= 0,19 W/m ² K CT= 442 kJ/m ² K CT _{sala} = 442 kJ/m ² K α cobertura: 0,8	E14: Vene 2	E15: Vent
CE18	E4: CT _{par} = 384 kJ/m ² K	E8 + E12 CT _{cob} = 442 kJ/m ² K + α 2 _{cob} = 0,3	E14: Vene 2	E15: Vent
CE19	E4 + E9: CT _{par} = 384 kJ/m ² K + α 1 _{par} = 0,8	E8 + E12 CT _{cob} = 442 kJ/m ² K + α 2 _{cob} = 0,3	E14: Vene 2	E15: Vent
CE20	E4 + E10: CT _{par} = 384 kJ/m ² K + α 2 _{par} = 0,3	E8 + E12 CT _{cob} = 442 kJ/m ² K + α 2 _{cob} = 0,3	E14: Vene 2	E15: Vent

Figura 27 - Resultados combinações 18, 19 e 20



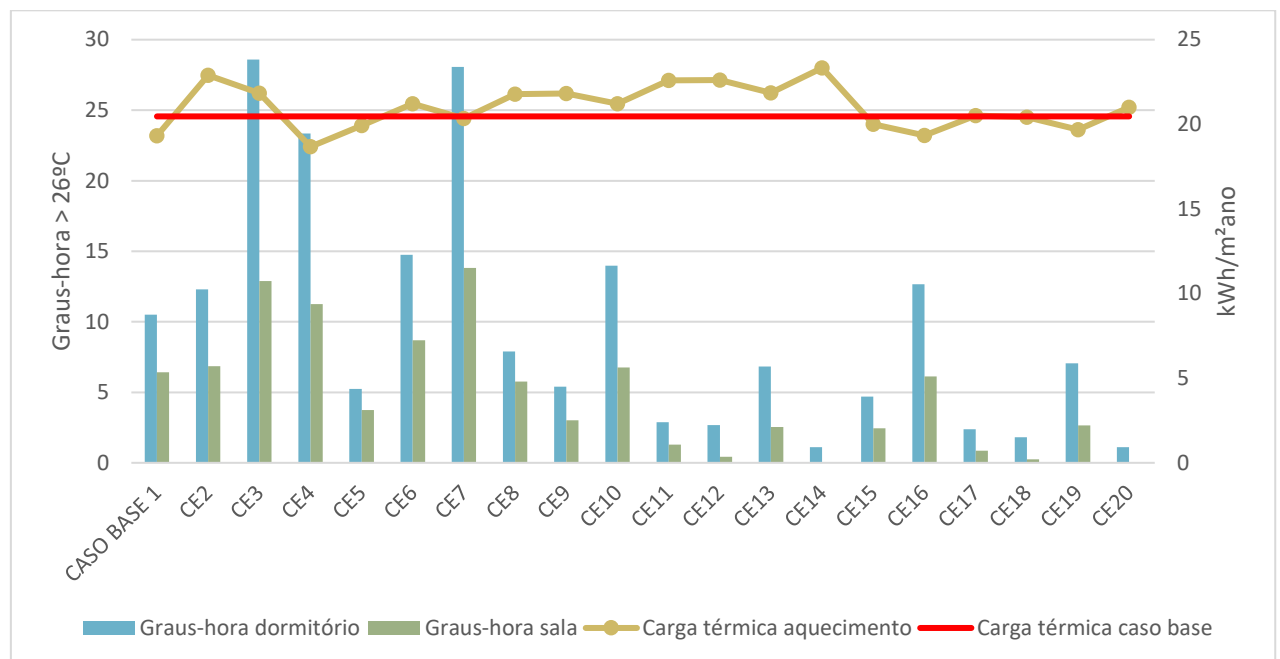
As combinações 18, 19 e 20 seguem o mesmo padrão das combinações 15, 16 e 17, porém apresentam valores mais reduzidos de graus-hora de sobreaquecimento e valores mais altos de carga térmica, por aplicarem uma cor mais clara na cobertura.

Todas as combinações se mostram mais eficientes no período de calor que o Caso base 1, e no inverno, as combinações 19 e 20 reduzem a carga térmica de aquecimento em relação

ao caso base e na combinação 20 o valor de carga térmica tem um acréscimo de 3% em relação ao Caso base.

A Figura 28 e a Tabela 22 apresentam os resultados de todas as combinações simuladas. A linha vermelha representa o valor de carga térmica do caso base.

Figura 28 - Resultados das combinações



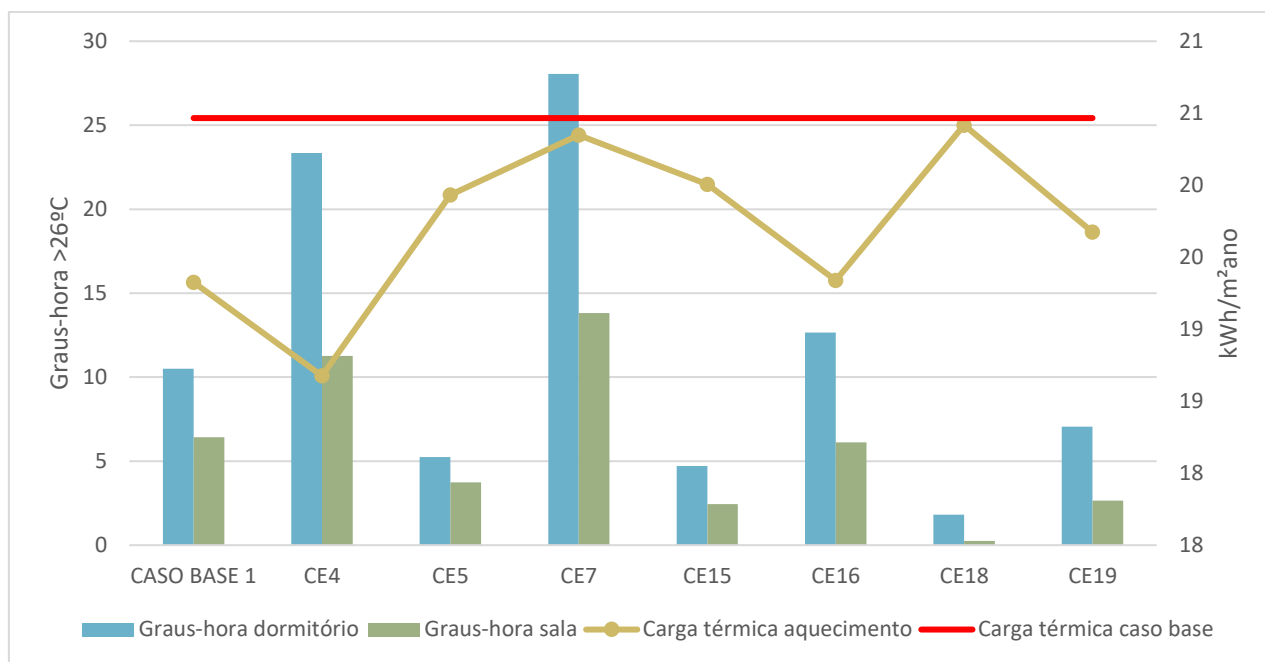
Pode-se observar que muitas combinações praticamente eliminaram os graus-hora de sobreaquecimento da edificação e que algumas combinações reduziram a carga térmica de aquecimento da edificação.

Tabela 22 – Resultados das combinações

Combinação	Carga térmica aquecimento (kWh/m ²)	Diferença (%)	Sala			Dormitório		
			Graus-hora >26°C	% horas do ano >26°C	Diferença (%)	Graus-hora >26°C	% horas do ano >26°C	Diferença (%)
CASO BASE	20.47		11709.45	31.75%		12773.41	33.07%	
CASO BASE 1	19.33	-5.6%	6.42	0.24%	-99.95%	10.50	0.42%	-99.92%
CE2	22.89	+11.8%	6.86	0.25%	-99.94%	12.29	0.48%	-99.90%
CE3	21.83	+6.7%	12.87	0.33%	-99.89%	28.58	0.62%	-99.78%
CE4	18.68	-8.7%	11.26	0.32%	-99.90%	23.34	0.59%	-99.82%
CE5	19.93	-2.6%	3.73	0.23%	-99.97%	5.24	0.24%	-99.96%
CE6	21.21	+3.6%	8.70	0.29%	-99.93%	14.74	0.56%	-99.88%
CE7	20.35	-0.6%	13.82	0.33%	-99.88%	28.06	0.63%	-99.78%
CE8	21.78	+6.4%	5.77	0.23%	-99.95%	7.89	0.32%	-99.94%
CE9	21.83	+6.6%	3.03	0.18%	-99.97%	5.40	0.30%	-99.96%
CE10	21.21	+3.6%	6.75	0.24%	-99.94%	13.98	0.54%	-99.89%
CE11	22.59	+10.4%	1.28	0.13%	-99.99%	2.88	0.15%	-99.98%
CE12	22.60	+10.4%	0.43	0.07%	-100.00%	2.67	0.15%	-99.98%
CE13	21.85	+6.8%	2.54	0.16%	-99.98%	6.83	0.30%	-99.95%
CE14	23.33	+14.0%	0.00	0.01%	-100.00%	1.10	0.07%	-99.99%
CE15	20.01	-2.2%	2.44	0.16%	-99.98%	4.70	0.17%	-99.96%
CE16	19.34	-5.5%	6.11	0.23%	-99.95%	12.66	0.48%	-99.90%
CE17	20.52	+0.3%	0.85	0.11%	-99.99%	2.38	0.15%	-99.98%
CE18	20.42	-0.2%	0.25	0.06%	-100.00%	1.82	0.09%	-99.99%
CE19	19.68	-3.9%	2.65	0.18%	-99.98%	7.05	0.30%	-99.94%
CE20	21.01	+2.7%	0.01	0.01%	-100.00%	1.11	0.07%	-99.99%

Para escolher a melhor combinação, serão analisadas as combinações que não apresentaram acréscimo da carga térmica em relação ao caso base. Os resultados do Caso base 1 e das combinações 4, 5, 7, 15, 16, 17 e 18 são apresentados na Figura 29.

Figura 29 – Combinação com resultados favoráveis quanto à carga térmica de aquecimento



O Caso base 1 e a combinação 16 apresentam valores muito próximos de carga térmica de aquecimento e de graus-hora de sobreaquecimento, porém o Caso base 1 é mais eficiente. Comparando as combinações 5, 15 e 19, que possuem valores de carga térmica de aquecimento próximos, a combinação 15 tem o menor valor de graus-hora de sobreaquecimento. A combinação 7 e 18 também apresentam valores de carga térmica de aquecimento bem próximos e a combinação 18 é mais eficiente no período de calor.

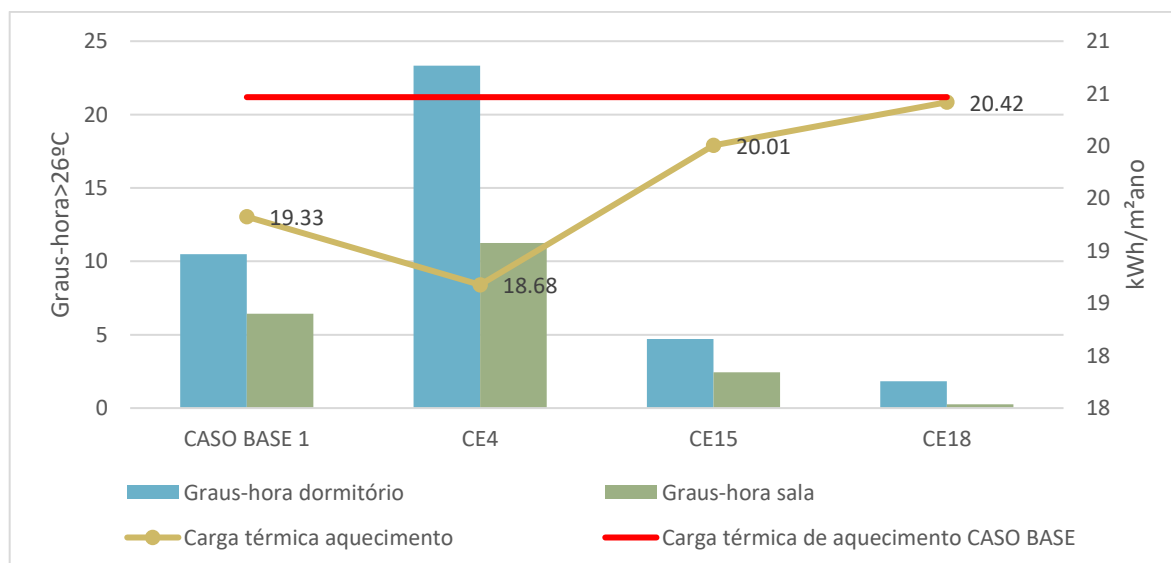
Frente a isso, o Caso base 1 e as combinações 4, 15 e 18 são as combinações mais adequadas para melhorar a eficiência termo-energética do edifício durante o ano inteiro. A Tabela 23 apresenta a descrição dessas combinações.

Tabela 23 - Melhores combinações de estratégias

COMPONENTE	CASO BASE	COMBINAÇÕES		
Parede externa	Bloco de concreto + isolante 16 cm U: 0,19 W/m²K CT: 215 kJ/m²K	C1	Isolante 16 cm	U: 0,19 W/m²K
			Parede dupla	CT: 215 kJ/m²K
		C4	Isolante 16 cm	U: 0,19 W/m²K
			Parede dupla	CT: 215 kJ/m²K
		C15	Isolante 16 cm	U: 0,19 W/m²K
			Parede dupla	CT: 215 kJ/m²K
		C18	Isolante 16 cm	U: 0,19 W/m²K
			Parede dupla	CT: 215 kJ/m²K
Cobertura	Telha cerâmica+ isolante 38 cm + concreto 20 cm U: 0,19 W/m²K CT: 442 kJ/m²K Telha cerâmica+ isolante 38 cm CTsala: 18 kJ/m²K	C1	Isolante 38 cm	U: 0,19 W/m²K
			Concreto 20 cm	CTsala: 18 kJ/m²K
		C4	Isolante 38 cm	U: 0,19 W/m²K
			Concreto 20 cm	CTsala: 18 kJ/m²K
		C15	Isolante 38 cm	U: 0,19 W/m²K
			Concreto 20 cm	CTsala: 18 kJ/m²K
		C18	Isolante 38 cm	U: 0,19 W/m²K
			Concreto 20 cm	CTsala: 18 kJ/m²K
Absortância	α parede: 0,5 α cobertura: 0,8	C1	α parede: 0,5 α cobertura: 0,8	
		C4	α parede: 0,8 α cobertura: 0,8	
		C15	α parede: 0,5 α cobertura: 0,5	
		C18	α parede: 0,5 α cobertura: 0,3	
Sombreamento	Sem venezianas	C1	Veneziana de tábuas horizontais inclinadas	
		C4	Veneziana de tábuas horizontais inclinadas	
		C15	Veneziana de tábuas horizontais inclinadas	
		C18	Veneziana de tábuas horizontais inclinadas	
Ventilação	Sem ventilação	C1	Ventilação natural seletiva diurna	
		C4	Ventilação natural seletiva diurna	
		C15	Ventilação natural seletiva diurna	
		C18	Ventilação natural seletiva diurna	

A Figura 30 apresenta os resultados dessas combinações.

Figura 30 – Resultados das melhores combinações de estratégias



O objetivo de melhorar a eficiência termo-energética da edificação durante o ano inteiro foi alcançado, as quatro combinações (Caso base 1 e combinações 4, 8 e 15) quase eliminaram totalmente os graus-hora de sobreaquecimento e reduziram a carga térmica de aquecimento da edificação.

No período de calor, os graus-hora de sobreaquecimento dos ambientes foram reduzidos em até 99,99% em relação ao caso base, e a carga térmica de aquecimento foi reduzida em até 8,7% em relação ao caso base, combinando as estratégias já mencionadas.

Como o objetivo do trabalho é de melhorar a eficiência da edificação no ano inteiro, a combinação que apresentou o melhor desempenho foi a combinação 4 (Tabela 24), que combinou o aumento da capacidade térmica da parede externa da edificação e da cobertura da sala, o aumento da absorvância da parede, a adição de uma veneziana de tábuas horizontais inclinadas e a adição de uma ventilação natural. A combinação dessas estratégias reduziu em 99,9% os graus-hora de sobreaquecimento na sala e em 99,82% no dormitório e ainda reduziu em 9% a carga térmica de aquecimento em relação ao caso base da edificação.

Tabela 24 – Melhor combinação de estratégias

COMPONENTE	CASO BASE	COMBINAÇÃO 4	
Parede externa	Bloco de concreto + isolante 16 cm U: 0,19 W/m ² K CT: 215 kJ/m ² K	Isolante 16 cm	U: 0,19 W/m ² K
		Parede dupla de bloco de concreto + isolante 16 cm	CT: 384 kJ/m ² K
Cobertura	Telha cerâmica+ isolante 38 cm + concreto 20 cm U: 0,19 W/m ² K CT: 442 kJ/m ² K Telha cerâmica+ isolante 38 cm CTsala: 18 kJ/m ² K	Isolante 38 cm	U: 0,19 W/m ² K
		Concreto 20 cm	CTsala: 442 kJ/m ² K
Absortância solar	α parede: 0,5 α cobertura: 0,8	α parede: 0,8 α cobertura: 0,8	
Veneziana	Sem venezianas	Veneziana de tábuas horizontais inclinadas	
Ventilação natural	Sem ventilação	Ventilação natural seletiva diurna	

5 CONCLUSÕES

Este trabalho usou como base uma edificação residencial localizada na França, que apresenta um alto nível de isolamento na sua envoltória, modelada no programa EnergyPlus e submetida a uma análise para avaliar a melhor combinação de estratégias para melhorar a eficiência termo-energética.

Os resultados foram analisados através da carga térmica de aquecimento e dos graus-hora de sobreaquecimento. As zonas analisadas foram a sala e um dormitório, ambientes de permanência prolongada.

Analisando as temperaturas internas dos ambientes, percebeu-se que grande parte dos valores de temperatura interna dos ambientes estão acima do valor da temperatura externa e que, e em grande parte do período de calor as temperaturas ultrapassam 26°C. Diante disso, as estratégias aplicadas no trabalho tiveram o objetivo de eliminar o sobreaquecimento das zonas de permanência prolongada, e se possível também reduzir a carga térmica de aquecimento da edificação.

Analisando os resultados das simulações pode-se observar que algumas estratégias foram mais favoráveis para o período de calor, outras para o período de inverno, algumas favoreceram a edificação durante o ano inteiro, e algumas combinações melhoraram a eficiência da edificação ainda mais.

Ao variar a espessura do isolamento das paredes e coberturas, aumentando a transmitância térmica das superfícies, houve uma pequena redução nos graus-hora de sobreaquecimento, porém o valor da carga térmica de aquecimento apresentou um acréscimo significativo, tornando inviável uma redução muito grande no nível de isolamento dessa edificação. Dessa forma, neste caso a utilização de isolante nas paredes favorece a edificação durante o inverno, impedindo o fluxo de calor do interior para o exterior. Porém, piorou o desempenho dos ambientes no período de calor.

Já com o aumento da capacidade térmica da parede e da cobertura da sala, houve redução na quantidade de graus-hora acima de 26°C e na carga térmica de aquecimento, sendo favorável para a edificação durante o ano inteiro.

Com relação à variação da absorvância solar da parede e cobertura, diminuindo o seu valor, ou seja, aplicando uma cor mais clara nas superfícies, a quantidade de graus-hora acima de 26°C diminuiu, enquanto que ocorreu um pequeno acréscimo na carga térmica de

aquecimento. Portanto, a utilização de cores claras nas superfícies favorece o dormitório e a sala quanto aos graus-hora de sobreaquecimento e piora o desempenho do aquecimento da edificação.

Ao adicionar sombreamento nas aberturas com a adição de venezianas, ocorreu uma redução significativa na quantidade de graus-hora acima de 26°C nos dois ambientes, devido a diminuição do ganho de calor com o impedimento da incidência direta de radiação. Com a adição de dois tipos de veneziana de madeira muito utilizados na França, houve uma redução nos graus-hora de 27% na sala e de 51% no dormitório. A utilização de venezianas teve mais influência nos resultados do dormitório, pois as suas duas aberturas foram sombreadas, enquanto na sala somente a menor abertura foi sombreada, sendo que a sua maior abertura localizada na sacada, já era sombreada pelo beiral do telhado. O valor de carga térmica não sofreu muita variação, sendo que no inverno, o sombreamento das aberturas ocorre apenas durante a noite.

A ventilação natural foi a estratégia que apresentou maior impacto no período de calor, reduzindo bastante a quantidade de graus-hora acima de 26°C nos dois ambientes. A redução nos graus-hora foi de 98% na sala e de 94% no dormitório. Pode-se observar que o impacto da ventilação foi um pouco maior na sala, já que esse ambiente possui aberturas maiores.

Com os resultados das estratégias simuladas individualmente, optou-se por adicionar em todas as combinações, as estratégias que apresentaram resultados favoráveis em relação aos valores de graus-hora de sobreaquecimento e de carga térmica que aquecimento serão adicionadas em todas as combinações: a variação da capacidade térmica da parede externa e cobertura da sala, sombreamento e ventilação natural. Essa combinação reduziu a quantidade de graus-hora acima de 26°C em 99,95% para a sala e de 99,92% para o dormitório e a carga térmica de aquecimento foi reduzida em 6%, se mostrando uma combinação muito eficiente para a edificação.

A combinação da ventilação natural, sombreamento das aberturas, aumento da capacidade térmica e com o aumento da transmitância térmica das superfícies mudou o comportamento dos resultados. Diminuindo o nível de isolamento, a quantidade de graus-hora acima de 26°C dos ambientes aumentou, assim como o valor de carga térmica de aquecimento. Portanto, a parede com inércia térmica e menor valor de transmitância térmica, neste caso, apresenta melhor desempenho para ambos os cômodos, configurando a melhor opção.

Já a combinação da ventilação natural, sombreamento das aberturas, aumento da capacidade térmica, aumento da transmitância térmica e com uma redução da absorvância solar

das superfícies a quantidade de graus-hora acima de 26°C agora diminuiu e a combinação se torna mais eficiente durante o período de calor, porém durante o inverno o valor de carga térmica teve um acréscimo de 7% em relação ao caso base.

Analisando os resultados das combinações em que o valor da absorvância das superfícies foi modificado, se verificou que o desempenho da variação da absorvância foi o mesmo de quando analisado individualmente. Reduzindo o valor da absorvância das superfícies, ou seja, utilizando cores mais claras, a quantidade de graus-hora acima de 26°C também reduz, enquanto ocorre um pequeno acréscimo na carga térmica de aquecimento.

Para escolher a melhor combinação, foram analisadas as combinações que não apresentaram acréscimo da carga térmica em relação ao Caso base: O Caso base 1 e as combinações 4, 5, 7, 15, 16, 17 e 18. Ao analisar todas as combinações, pode-se observar que oito delas melhoraram a eficiência termo-energética do edifício durante o ano inteiro, sendo que quatro delas foram avaliadas como as melhores combinações, eliminando grande parte dos graus-hora de sobreaquecimento e reduzindo a carga térmica de aquecimento da edificação. As quatro combinações têm como base a adição de ventilação natural, venezianas e o aumento da capacidade térmica da parede e cobertura da sala. Em uma delas se reduziu o valor da absorvância solar da cobertura para 0,5, outra variou essa mesma estratégia para 0,3, outra aumentou o valor da absorvância da parede para 0,8 e a outra só combinou as estratégias em comum.

Para alcançar o objetivo do trabalho e melhorar a eficiência da edificação no ano inteiro, a combinação que apresentou o melhor desempenho foi a combinação que aliou o aumento da capacidade térmica da parede externa e da cobertura da sala, o aumento da absorvância da parede, a adição de uma veneziana de tábuas horizontais inclinadas e a adição de uma ventilação natural. A combinação dessas estratégias reduziu em 99,9% os graus-hora de sobreaquecimento na sala e em 99,82% no dormitório e ainda reduziu em 8,7% a carga térmica de aquecimento do caso base da edificação.

Deve-se ressaltar que essa foi a melhor combinação de estratégias para melhorar a eficiência termo-energética para a edificação e clima utilizados como base neste estudo. Os resultados podem variar dependendo do clima, da geometria, das propriedades dos materiais utilizados nos componentes construtivos, das cargas internas e dos sistemas da edificação.

5.1 Limitações do trabalho

As limitações encontradas no desenvolvimento do trabalho foram:

- Resultados validos somente para a edificação e clima analisados;

- Dificuldade em representar fielmente o comportamento de um edifício na forma de um modelo computacional, pois muitos dados de entrada, como padrões de uso, são adotados e não representam a edificação específica.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Validar o modelo com a comparação de dados medidos na residência;
- Avaliação do custo de implantação de cada alternativa simulada;
- Avaliação do fluxo de calor nas superfícies;
- Aplicar outras alternativas, como: outros tipos de ventilação, variação do tamanho das aberturas, outros tipos de parede e cobertura;
- Analisar e comparar o comportamento do modelo em outros climas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho Térmico de Edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações Habitacionais - Desempenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ADEME - AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE. **Actualisation du scénario énergie-climat ADEME 2035-2050**. Angers: Out. 2017.

Disponível em:

<2018.http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe_visions2035-50_010305.pdf >. Acesso em: 01 mar. 2018.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE 90.1-2016: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. SI ed. Atlanta: Ashrae, 2016.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE 140-2014: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs**. SI ed. Atlanta: Ashrae, 2017.

ANDRADE, Suely Ferraz de. **Estudo de estratégias bioclimáticas no clima de Florianópolis**. 1996. 147 f... Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

BHATTACHARYA, Shaoni. **European heatwave caused 35,000 deaths**. Out. 2003.

Disponível em: < <https://www.newscientist.com/article/dn4259-european-heatwave-caused-35000-deaths/> >. Acesso em: 06 fev. 2018.

BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. **Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia**. Brasília, DF, Disponível em: <

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10295.htm>. Acesso em: 08 mai. de 2018.

BRASIL. Portaria nº 18, de 16 de janeiro de 2012. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Residenciais**. Brasília, DF, Disponível em:< <http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/RTQR.pdf>>. Acesso em: 08 mai. de 2018.

BRASIL. Portaria nº 372, de 17 de setembro de 2010. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. Brasília, DF, Disponível em: < http://pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/Port372-2010_RTQ_Def_Edificacoes-C_rev01.pdf>. Acesso em: 08 mai. de 2018.

CEN 2004. **Explanation of the general relationship between various CEN standards and the EPBD (Umbrella Document)**. Versão 3a. CEN/BT WG 173 EPBD N 15 rev., 25 out. 2004.

CEREMA – CENTRE D’ÉTUDES ET D’EXPERTISE SUR LES RISQUES, L’ENVINNEMENT, LA MOBILITÉ ET L’AMÉNAGEMENT. **Système de climatisation et réseaux de froid**. Dez. 2016. Disponível em: < http://reseaux-chaleur.cerema.fr/wp-content/uploads/170329_Syst_clim_RDFroid.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2018.

CHVATAL, Karin Maria Soares. **Relação entre o nível de isolamento térmico da envolvente dos edifícios e o potencial de sobreaquecimento no verão**. 2007. 280f.. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2007.

CHVATAL, K. M. S.; MALDONADO, E. A. B.; CORVACHO, M.H.P. The impact of envelope insulation and ventilation on summer performance. In: INTERNACIONAL CONFERENCE “PASSIVE AND LOW ENERGY COOLING FOR THE BUILT ENVIRONMENT”, 2005, Santorini. **Proceedings...** Santorini, Greece, mai. 2005.

COLLET, Philippe. **La réglementation thermique de 1974 à aujourd'hui**. Jun. 2011.

Disponível em: <<https://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/energie-batiment-rt2012/historique-reglementation-thermique.php4>>. Acesso em: 23 fev. 2018.

DOE – U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Building Energy Software Tools Directory**.

2018a. Disponível em: < <https://www.buildingenergysoftwaretools.com>>. Acesso em: 31 jan. 2018a.

DOE - U.S. DEPARTMENT OF ENERGY'S. **EnergyPlus**. 2018b. Disponível em: <

<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 30 jan. 2018b.

ELI, Letícia Gabriela. **Avaliação de medidas de eficiência energética em uma edificação multifamiliar por meio do regulamento brasileiro de etiquetagem**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

ERT2012. **Historique des Réglementations Thermiques**. 2018. Disponível em:

<<https://www.e-rt2012.fr/explications/generalites/precedentes-reglementations-thermiques/>>. Acesso em: 23 fev. 2018.

EU Official Journal. **Directive on the energy performance of buildings**. 2002/91/CE. 16

Dez. 2002. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2003.001.01.0065.01.ENG&toc=OJ:L:2003:001:TOC>. Acesso em: 27 fev. 2018.

EU Official Journal. **Directive on the energy performance of buildings**. 2010/31/UE. 19

Mai. 2010. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2010.153.01.0013.01.ENG&toc=OJ:L:2010:153:TOC>. Acesso em: 27 fev. 2018.

FRANÇA. Abr. 2011. **Réglementation thermique 2012: un saut énergétique pour les bâtiments neufs**. Disponível em: <[http://www.rt-](http://www.rt-batiment.fr/fileadmin/documents/RT2012/plaquetteRT2012_avril2011.pdf)

[batiment.fr/fileadmin/documents/RT2012/plaquetteRT2012_avril2011.pdf](http://www.rt-batiment.fr/fileadmin/documents/RT2012/plaquetteRT2012_avril2011.pdf)>. Acesso em: 28 fev. 2018.

FRANÇA. Jul. 2010. **Réglementation thermique: Grenelle Environnement 2012.**

Disponível em: < http://www.rt-batiment.fr/fileadmin/documents/RT2012/06_07_2010_-_generalisation_des_batiments_a_basse_consommation.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2018.

FRANÇA. Out. 2006. **Réglementation thermique 2005: des bâtiments confortables et performants.** Disponível em: < http://www.rt-batiment.fr/fileadmin/documents/RT2005/publications/rt2005_version09102006.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2018.

Disponível em: < http://www.rt-batiment.fr/fileadmin/documents/RT2005/publications/rt2005_version09102006.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2018.

FRANCO, Daniella. **Ondas de calor serão cada vez mais frequentes e longas.** Jun. 2017.

Disponível em: < <http://br.rfi.fr/mundo/20170622-ondas-de-calor-serao-cada-vez-mais-longas-e-frequentes-dizem-climatologistas>>. Acesso em: 06 fev. 2018.

HOLLADAY, M. **The history of superinsulated houses in North America.** British Columbia Building Envelope Council Vancouver, 2010. Vancouver: British Columbia, 22 set. 2010.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Balances 2017: Overview.** 2017a.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key world energy statistics.** 2017b.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Electricity information: Overview.** 2017c.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia. **Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.** 2018.

JUDKOFF, R.; NEYMARK, J. **International energy agency building energy simulation test (bestest) and diagnostic method.** (NREL/TP-472-6231). Golden, USA: National Renewable Energy Laboratory, 1995.

MALDONADO, E. The impacts of the EPBD upon the summer performance of buildings. In: INTERNACIONAL CONFERENCE “PASSIVE AND LOW ENERGY COOLING FOR THE BUILT ENVIRONMENT”, 2005, Santorini. **Proceedings...** Santorini, Greece, mai. 2005. p. 797-802.

MATOS, Michele. **Simulação computacional de desempenho térmico de residências em Florianópolis utilizando a ventilação natural**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MELO, Ana Paula. **Análise da influência da transmitância térmica no consumo de energia de edificações comerciais**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MELO, Ana Paula. **Avaliação computacional de estratégia para a redução do consumo de energia elétrica em um hotel em Florianópolis**. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; NETO, J. A. B. C. **Uso de Instrumentos Computacionais para Análise do Desempenho Térmico e Energético de Edificações no Brasil**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.5, n.4, p. 47-68, out./dez. 2005.

PEREIRA, Helena A. da C.; MELO, Ana Paula; VERSAGE, Rogério; SORGATO, Márcio; LAMBERTS, Roberto. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus – Versão 8.0**. Florianópolis, 2013. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Manual_Ventilacao_v8_0.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2018.

PLAN BATIMENT DURABLE. **Comprendre la RT 2012**. Mar. 2016. Disponível em: <<http://www.planbatimentdurable.fr/comprendre-la-rt-2012-r174.html>>. Acesso em: 28 fev. 2018.

SORGATO, Marcio José. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. 2009. 216f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

VALE B.; VALE R.J.D. **The autonomous house: design and planning for self-sufficiency**. 1. Ed. Londres: Universe Books, Dez. 1975. 224 p.

WESTPHAL, Fernando S.; LAMBERTS, Roberto. Building Simulation Calibration Using Sensitivity Analysis. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 9., 2005, Montreal. **Proceedings...** Montreal, Canadá: IBPSA, ago. 2005.

ZHU, Dandan; HONG, Tianzhen; YAN, Da; WANG, Chuang. A detailed loads comparison of three building energy modeling programs: EnergyPlus, DeST and DOE-2.1E. **Building Simulation**, [s.l.], Set. 2013. Vol. 6, n. 3, p. 323–335.